

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SIGNIE LAUREANO FRANÇA SANTOS

**MÉTODO PARA SELEÇÃO ÓTIMA DE *TAP'S* DE REGULADORES DE
TENSÃO EM SITUAÇÕES DE INTERRUPÇÃO DE ENERGIA**

CURITIBA

2013

SIGNIE LAUREANO FRANÇA SANTOS

**MÉTODO PARA SELEÇÃO ÓTIMA DE *TAP'S* DE REGULADORES DE
TENSÃO EM SITUAÇÕES DE INTERRUPÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Thelma Solange Piazza Fernandes

CURITIBA

2013

Santos, Signie Laureano França

Método para seleção ótima de tap's de reguladores de tensão em situações de interrupção de energia / Signie Laureano França Santos.

– Curitiba, 2013.

124 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Elétrica.

Orientador: Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Coorientadora: Thelma Solange Piazza Fernandes

Bibliografia: p. 102-106

1. Regulador de voltagem. 2. Fluxo de potência. 3. Interrupções de energia . I. Oliveira, Gustavo Henrique da Costa. II. Fernandes, Thelma Solange Piazza. III. Título.

CDD 621.3743

TERMO DE APROVAÇÃO

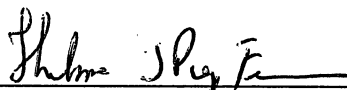
Signie Laureano França Santos

MÉTODO PARA SELEÇÃO ÓTIMA DE TAP'S DE REGULADORES DE TENSÃO EM SITUAÇÕES DE INTERRUPÇÃO DE ENERGIA

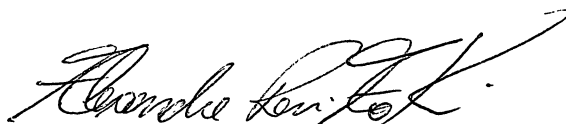
Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Paraná.



Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira – Orientador
Universidade Federal do Paraná



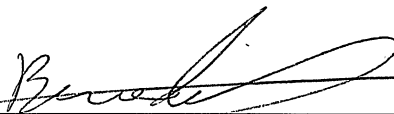
Prof^a. Dr^a. Thelma Solange Piazza Fernandes – Co-orientadora
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Roman Kuiava
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Curitiba, 12 de Agosto de 2013

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus queridos pais, Eliana e Denizar, por todo apoio, incentivo e amor ao longo destes anos de curso, e acima de tudo, por terem me ensinado de maneira tão sutil a importância dos estudos para minha vida pessoal e profissional.

Agradeço também ao meu querido esposo Daniel por todo carinho dispensado a mim e por estar sempre ao meu lado durante a realização deste trabalho.

Ao professor Gustavo H. da Costa Oliveira e à professora Thelma S. Piazza Fernandes pela confiança, paciência e excelente orientação no desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho e a empresa propriamente dita, LACTEC, pelas condições proporcionadas para a realização do curso e pela compreensão de minhas ausências no trabalho, além da cooperação e amizade desde o início desta jornada e o incentivo para a minha qualificação profissional.

RESUMO

Em alimentadores de distribuição com cargas leves e pesadas e reguladores de tensão conectados ao longo do seu tronco principal e de seus ramais, após a ocorrência de interrupções de energia, quando as cargas que possuem proteções locais (geralmente pesadas) são desconectadas por suas proteções, há uma mudança no perfil de cargas conectado ao alimentador no momento do restabelecimento de energia. Na ocorrência de interrupções de energia, a tensão na entrada dos reguladores de tensão é nula e os *tap's* destes equipamentos permanecem fixos na posição que se encontravam previamente à interrupção. Nestes casos, os *tap's* dos reguladores de tensão ajustados previamente às interrupções podem não ser mais adequados ao novo perfil de cargas no momento do restabelecimento do sistema. Este ajuste inadequado pode acarretar elevações de tensão de curta duração a jusante da localização desses equipamentos, nas instalações elétricas daquelas cargas que não possuem proteções locais e consequentemente não foram desconectadas do alimentador (geralmente consumidores residenciais). Sendo assim, esta dissertação apresenta um método que adiciona um controle supervisorio em paralelo ao controle convencional dos reguladores de tensão e que efetua a seleção ótima dos seus *tap's* em situações de interrupção de energia, através da execução de um Fluxo de Potência Ótimo, para o momento do restabelecimento do sistema. O método permite a mudança *a priori* da posição previamente ajustada (antes da interrupção de energia), para a posição ótima identificada para o momento do restabelecimento, e, posteriormente a este o ajuste de *tap's* volta a ser realizado pelo controle convencional dos reguladores de tensão. Com isso, tem-se a mitigação das elevações de tensão de curta duração geradas na rede de distribuição. O método proposto é validado com estudos de caso em ambiente de simulação. Nos estudos de caso realizados verificou-se que a solicitação tema da dissertação é efetiva, sendo geradas elevações de tensão de curta duração de até 33% no sistema em função do ajuste inadequado dos *tap's* dos reguladores de tensão quando são avaliados alimentadores que contam com reguladores de tensão conectados em série. Quando o método proposto é implementado estas elevações de tensão são eliminadas ou mitigadas, demonstrando a eficiência do método.

Palavras-chave: Regulador de Tensão. Fluxo de Potência Ótimo. Interrupções de Energia.

ABSTRACT

In distribution feeders with light and heavy loads and voltage regulators connected along its main trunk and its branches, upon the occurrence of power interruptions, when the loads that have local protections (usually heavy) are disconnected for their protections, there is a change in the profile of loads connected to the feeder at the time of restoring power. In the event of power outages, the input voltage of the voltage regulators is null and tap these equipment's remain fixed in the position they were in prior to stopping. In these cases, the tap of the voltage regulator's previously adjusted to disruption may not be most suitable to the new profile of loads upon system reset. This improper adjustment can cause voltage swells downstream of the location of equipment in the electrical loads that do not have those local protections and consequently were not disconnected by feeder (usually residential). Thus, this work presents a method that adds a supervisory control in parallel to the conventional control of voltage regulators and effecting optimal selection of your tap's in situations of power interruption, through the execution of Optimal Power Flow, to the time of restoration the system. The method allows changing a prior position previously set (before power failure) for the optimum position identified for the time of restoration, and subsequently this setting tap's turn to be carried out by conventional control of the voltage regulators . With this, there is the mitigation of swells generated in the distribution network. The proposed method is validated with case studies in simulation environment. In the case studies it was found that the request dissertation topic is effective, being generated swells by up to 33% in the system due to improper adjustment of the tap's of voltage regulators when evaluating feeders that rely on regulators voltage connected in series. When the proposed method is implemented these swells are eliminated or mitigated, demonstrating the efficiency of the method.

Keywords: Voltage Regulator. Optimal Power Flow. Power Interruptions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas de onda típicas de problemas de qualidade de energia elétrica	26
Figura 2 – Corrente transitória proveniente de uma descarga atmosférica	27
Figura 3 – Transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores	29
Figura 4 – Interrupção precedida de um afundamento de tensão	31
Figura 5 – Decréscimo da tensão ocorrido pela partida de um motor	32
Figura 6 – Afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra	33
Figura 7 – Elevação instantânea do valor rms da tensão	34
Figura 8 – Níveis de tensão padronizados entre 1 kV e 69 kV	36
Figura 9 – Resposta de um motor de indução à alimentação desequilibrada	41
Figura 10 – Onda senoidal de tensão e onda da quinta harmônica	43
Figura 11 – Distorção harmônica da onda de tensão com a presença da quinta harmônica	43
Figura 12 – Alimentador de distribuição com e sem regulador de tensão	48
Figura 13 – Banco de reguladores de tensão instalado em um alimentador de distribuição	49
Figura 14 – Ligação para redução de tensão	50
Figura 15 – Ligação para elevação de tensão	51
Figura 16 – Chave reversora do circuito do regulador de tensão	51
Figura 17 – Reator de comutação do circuito do regulador de tensão	53
Figura 18 – Operação do reator de comutação	53
Figura 19 – Circuito mecânico do regulador de tensão 32 Degraus Tipo A	55
Figura 20 – Circuito de controle do regulador de tensão	56
Figura 21 – Fluxograma da lógica básica para ajuste dos <i>tap</i> 's em reguladores de tensão	57
Figura 22 – Ajustes do controle convencional para mudança de tap do RT	59
Figura 23 – Circuito do Compensador de Queda de Linha	60
Figura 24 – Fluxograma do método proposto para ajuste dos <i>tap</i> 's do RT	72
Figura 25 – Alimentador de distribuição com RTs conectados em série	75
Figura 26 – Sistema de 36 barras	78
Figura 27 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional	80
Figura 28 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto	81
Figura 29 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional	84

Figura 30 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto	85
Figura 31 – Caso 3: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional ou pelo Método Proposto	88
Figura 32 – Sistema de 55 barras	89
Figura 33 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional.....	90
Figura 34 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto	91
Figura 35 – Caso 1: Regulador de Tensão com Controle Alternativo	93
Figura 36 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional.....	95
Figura 37 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.....	29
Tabela 2 – Classificação dos níveis de tensão padronizados entre 1 kV e 69 kV.....	36
Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais	44
Tabela 4 – Classificação Geral dos Distúrbios de QEE	47

LISTA DE VARIÁVEIS E SÍMBOLOS

TA – tensão de atendimento

TL – tensão de leitura

TR – tensão de referência

V – tensão em Volts

pu – por unidade

V_N – tensão nominal

\dot{V}_e – tensão de entrada do regulador de tensão

\dot{V}_s – tensão de saída do regulador de tensão

\dot{V}_{BT} – tensão na bobina de *tap*'s ou enrolamento série do regulador de tensão

\dot{V}_{BE} – tensão na bobina de excitação ou enrolamento comum do regulador de tensão

V_{ref} – tensão de referência ajustada no regulador de tensão

ΔS – largura de Banda ajustada no regulador de tensão

ΔV – desvio de tensão

t – tempo

Δt – temporização ajustada no regulador de tensão

y – comando para ajuste dos *tap*'s

\dot{V}_i – tensão na barra i

θ_i – ângulo de tensão na barra i

\mathbf{z} – vetor de variáveis do FPO

V_i – módulo de tensão na barra i

P_g – vetor de geração de potência ativa

P_d – vetor de demanda de potência ativa

Q_d – vetor demanda de potência reativa

Q_g – vetor de geração de potência reativa

\dot{Y} – matriz de admitância de barra

\dot{V} – vetor de tensão fasorial

tp – relação das magnitudes dos reguladores de tensão

tp_o – *tap* ótimo do regulador de tensão

nb – número de barras do alimentador de distribuição

nl – número de linhas do alimentador de distribuição

tp_i – *tap* inicial do regulador de tensão

s^{min} – vetor de variáveis de folga mínimas estritamente positivas

s^{max} – vetor de variáveis de folga máximas estritamente positivas

$ndes$ – número de restrições de desigualdade

μ – parâmetro barreira

λ – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade

π^{min} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites mínimos

π^{max} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites máximos

nig – número de restrições de igualdade.

W – matriz Hessiana

LISTA DE ABREVIações

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CBEMA – *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*

CÉNÉLEC – Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica

EPRI – *Electric Power Research Institute*

FPO – Fluxo de Potência Ótimo

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

MPDPI – Método Primal-Dual de Pontos Interiores

PCC – *Point of Common Coupling*

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

RT – Regulador de Tensão

VTCD – Variações de Tensão de Curta Duração

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

DTT – Distorção Harmônica Total de Tensão

LDC – *Line Drop Compensation*

rms – *Root Mean Square*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	18
1.3 JUSTIFICATIVAS	19
1.4 OBJETIVOS	20
1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	21
2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	23
2.1 TRANSITÓRIOS	26
2.1.1 Transitórios Impulsivos	27
2.1.2 Transitórios Oscilatórios	28
2.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	29
2.2.1 Interrupções de Curta Duração.....	30
2.2.2 Afundamentos de Tensão.....	31
2.2.3 Elevações de Tensão	34
2.3 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO	35
2.3.1 Interrupções Sustentadas	37
2.3.2 Sobretensões Sustentadas.....	38
2.3.3 Subtensões Sustentadas	39
2.4 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	40
2.5 DISTORÇÕES DA FORMA DE ONDA	42
2.5.1 Desvio do Nível de Corrente Contínua (CC).....	42
2.5.2 Harmônicos.....	42
2.5.3 Interharmônicos	45
2.5.4 Ruídos	45
2.5.5 Cortes (<i>Notches</i>).....	45

2.6 FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	46
2.7 VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA.....	46
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	47
3 REGULADORES DE TENSÃO	48
3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	49
3.1.1 Circuito Mecânico	50
3.1.2 Circuito de Controle	55
3.2 NOVAS TENDÊNCIAS PARA REGULADORES DE TENSÃO.....	61
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	62
4 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO	63
4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	64
4.1.1 Variáveis	64
4.1.2 Função Objetivo.....	65
4.1.3 Restrições de Igualdade	66
4.1.4 Restrições de Desigualdade	66
4.2 MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES.....	68
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	69
5 MÉTODO DESENVOLVIDO	70
5.1 METODOLOGIA	70
5.2 SOLUÇÃO DO FPO.....	73
5.3 REGULADORES DE TENSÃO CONECTADOS EM SÉRIE.....	75
6 RESULTADOS	77
6.1 INTRODUÇÃO	77
6.2 MODELO DOS REGULADORES DE TENSÃO.....	78
6.3 SISTEMA DE 36 BARRAS.....	78
6.3.1 Caso 1 – Falta na Saída da Subestação	79
6.3.2 Caso 2 – Falta ao Longo do Alimentador.....	83

6.3.3 Caso 3 – Falta em um Ramal do Alimentador sem RT	86
6.4 SISTEMA DE 55 BARRAS.....	88
6.4.1 Caso 1 – Falta na Saída da Subestação	89
6.4.2 Caso 2 – Falta ao Longo do Alimentador.....	94
7CONCLUSÕES	99
7.1 TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS.....	102
APÊNDICE A - MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES	107
ANEXO A – ARTIGO X CBQEE.....	115
ANEXO B – DADOS DOS SISTEMAS SIMULADOS	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O termo "Qualidade de Energia Elétrica" – QEE é definido pelo IEC (*International Electrotechnical Commission*) como um conjunto de parâmetros que definem as propriedades da qualidade de energia elétrica entregue ao usuário, em condições de operação normal, em termos de continuidade de fornecimento e características de tensão (simetria, frequência, magnitude e forma de onda) (IEC 61000-1-1, 1992). No padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), QEE é definida como fornecimento de energia a um equipamento de forma apropriada para sua operação e seu funcionamento adequados e ainda compatível com o resto do sistema e demais equipamentos conectados a este (IEE STD. 1100, 1992; IEEE STD. 100, 1996).

Diversos trabalhos impulsionaram o estudo sobre QEE e mostraram preocupações com este tema. Segundo (BOLLEN, 2000), (KAJIHARA, 1968) é a publicação mais antiga onde o termo QEE é mencionado, no qual é apresentada uma boa revisão dentro do contexto de qualidade de energia. Outras publicações de destaque são (CARTER, 1989; SUNDARAM *et al*, 1994).

Os prejuízos econômicos resultantes dos problemas relacionados ao sistema elétrico são muito elevados, e por isso a questão da qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores finais é hoje, mais do que nunca, objeto de grande preocupação. Segundo um relatório do EPRI – *Electric Power Research Institute* (SUNDARAM *et al*, 1994), os problemas relacionados com a qualidade e quebras no fornecimento de energia elétrica custam à economia dos Estados Unidos mais de 119 bilhões de euros por ano.

Em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, os impactos econômicos da qualidade da energia são enormes. Em função dessas razões há uma grande preocupação entre as empresas e os profissionais do ramo em analisar e diagnosticar os distúrbios da Qualidade de Energia Elétrica e desenvolver soluções técnicas e economicamente viáveis para amenizar ou acabar com os efeitos desses distúrbios nos diversos tipos de sistemas elétricos (IEEE STD. 446, 1995).

Os distúrbios de QEE que normalmente estão presentes em sistemas elétricos e que são classificados pela IEC são: transitórios, variações de tensão de curta ou longa duração, desequilíbrios de tensão, distorção da forma de onda, fator de potência, harmônicos, ruídos, flutuação de tensão, cortes, variações de frequência (SABIN, 1996).

Dentre os distúrbios existentes da QEE, esta dissertação dá uma atenção especial às variações de tensão de longa duração e de curta duração, que estão diretamente ligadas ao desvio da magnitude da tensão do seu valor nominal. Em relação às variações de tensão de longa duração, são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão e os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica (ANEEL, 2011). Por outro lado, atualmente, existe uma quantidade significativa de cargas sensíveis às variações de tensão de curta duração – VTCD incorporadas aos sistemas elétricos, o que impõem a necessidade das concessionárias em fornecer energia elétrica com nível de tensão idealmente constante aos consumidores, cada vez mais exigentes e amparados pelas leis que regulamentam a comercialização de energia.

Outros distúrbios comuns no sistema elétrico que merecem atenção são as interrupções momentâneas ou sustentadas no fornecimento de energia elétrica devido às ocorrências do sistema (manobras, curtos-circuitos, descargas atmosféricas, etc.). Quando há uma interrupção de energia, os equipamentos ligados à rede elétrica param de funcionar, mas logo que a energia é restabelecida, ou depois de uma interrupção momentânea, os equipamentos deveriam voltar a funcionar normalmente. No entanto, o modo como esta energia é restabelecida determina um perigo para a integridade dos equipamentos conectados à rede elétrica. Nesse caso, a preocupação principal recai sobre os equipamentos eletrônicos, uma vez que o restabelecimento de energia de modo abrupto pode vir a danificar os componentes internos destes equipamentos, conduzindo-os à má operação, ou em casos extremos, à completa inutilização (BOLLEN, 2000).

Uma série de trabalhos no intuito de desenvolver ou propor soluções para os distúrbios relacionados com a qualidade de energia elétrica têm sido desenvolvidos. Dentre eles destaca-se (CHUNG *et al*, 2003), no qual são apresentados diagnósticos para tais problemas e é desenvolvido um sistema para a melhoria da QEE. Em (DUGAN, 2002), também são abordados os distúrbios de QEE, analisando o impacto destes fenômenos nas cargas e fornecendo estratégias de mitigação

utilizadas pelas concessionárias e consumidores. Em (BOLLEN, 2000), uma análise detalhada das variações de tensão de curta duração e interrupções, aplicando técnicas matemáticas na solução destes distúrbios e métodos de mitigação, caracterização e comportamento de equipamentos sujeitos a estas variações de tensão também são apresentados.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema elétrico brasileiro conta com uma grande rede de distribuição, possuindo muitos alimentadores extensos que contam com um tronco principal e com ramais trifásicos e monofásicos. Na maioria destes alimentadores estão alocadas cargas de consumidores residenciais, comerciais e industriais, ou seja, tanto cargas consideradas leves quanto pesadas. As cargas pesadas geralmente possuem proteções locais que, em situações de interrupção de energia, as desconectam automaticamente do alimentador, de maneira que, no momento do restabelecimento de energia, o perfil de cargas conectado ao alimentador não é mais o mesmo que na situação pré-interrupção de energia. Entretanto, o controle convencional para ajuste de tap's dos reguladores de tensão, equipamentos muito empregados em sistemas de distribuição de energia elétrica para o ajuste e correção das variações de tensão de longa duração, mantem fixa a posição dos tap's do equipamento quando a tensão em sua entrada é nula, ou seja, quando ocorrem interrupções de energia.

Sendo assim, em situações de interrupção de energia, os tap's previamente ajustados nos reguladores de tensão podem não ser adequados para o novo perfil de cargas que estará conectado ao alimentador no momento do restabelecimento de energia. Se o carregamento do alimentador for reduzido significativamente e ocorrer o restabelecimento do sistema com os *tap's* dos reguladores ajustados conforme a situação pré-interrupção, níveis inaceitáveis de sobretensões momentâneas possivelmente serão gerados no sistema, sendo estes sentidos tanto pelos próprios bancos de reguladores de tensão e demais equipamentos conectados à rede como também pelos consumidores com cargas leves que ainda continuam conectados ao alimentador.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Em situações de interrupções de energia, o ajuste inadequado de *tap's* dos bancos de reguladores de tensão, equipamentos justamente empregados nos sistemas de distribuição para evitar variações de tensão de longa duração (regime permanente) nas instalações dos consumidores, pode acabar acarretando variações de tensão de curta duração (elevações de tensão), a jusante do local de instalação dos bancos de reguladores de tensão.

Quando ocorrem interrupções de energia em um alimentador da rede de distribuição, cargas pesadas (por exemplo, motores trifásicos de grande porte) que estão conectadas a estes alimentadores são desligadas automaticamente por suas proteções internas (locais). Isto reduz significativamente o carregamento do alimentador e, quando o sistema é restabelecido, o alimentador passa a contar praticamente apenas com cargas residenciais (leves). Nestes casos, sobretensões momentâneas podem ser registradas em seus bancos de reguladores de tensão conectados em série no alimentador durante o restabelecimento de sistemas com estas características. Isto ocorre porque, nestas situações, os *tap's* dos bancos de reguladores de tensão, conectados em série nos alimentadores, ajustados anteriormente à interrupção de energia permanecem fixos nas posições que se encontravam e não são mais adequados ao novo perfil de cargas conectadas ao alimentador no momento da reenergização do circuito, podendo provocar níveis inaceitáveis de sobretensões de curta duração à jusante de sua instalação na rede de distribuição de energia elétrica.

Embora muitos trabalhos da comunidade científica tratem de distúrbios que sucedem interrupções de energia no sistema (BOONCHIAM *et al*, 2006; MONTEIRO, 2011; DECKMANN, 2002), abordando diversas causas que levam à geração de tais distúrbios, nas bases de dados pesquisadas¹ não existem publicações que digam respeito às elevações de tensão de curta duração que são

¹ Pesquisas realizadas até março de 2013 com as palavras-chaves regulador de tensão, qualidade de energia elétrica, interrupções de energia e fundamentos de tensão de curta duração nas seguintes bases de dados:

IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>)

CAPES (<http://www.capes.gov.br>)

EPRI (<http://www.epri.com>)

Technology Research Database (<http://search.proquest.com>)

gerados em função do ajuste inadequado dos *tap's* dos reguladores de tensão no momento do restabelecimento de energia, em alimentadores de distribuição, quando estes não possuem mais o mesmo perfil de cargas conectadas anteriormente à interrupção.

Portanto, o desenvolvimento de um método que efetue automaticamente a seleção ótima dos *tap's* dos bancos de reguladores de tensão, durante o intervalo de tempo em que o alimentador está desligado, na ocorrência de uma interrupção no fornecimento de energia, será de grande importância para diminuir sobretensões impostas à maior parte das cargas alimentadas e consequentes danos elétricos em instalações de consumidores, no momento do restabelecimento de energia, e aos próprios equipamentos da concessionária conectados a jusante do local de instalação dos bancos de reguladores de tensão.

1.4 OBJETIVOS

O desafio deste trabalho consiste em desenvolver um método que possa atuar no regulador de tensão para ajustar os *tap's* do equipamento, em situações de interrupções de energia no sistema de distribuição, visando evitar a ocorrência de VTCD's e consequentemente danos elétricos à rede e aos consumidores.

O método proposto deve ser capaz de ajustar os *tap's* dos reguladores, de maneira otimizada, antes da reenergização do circuito, de modo que, no momento do religamento da energia, estes *tap's* estejam ajustados ao novo perfil de cargas conectadas ao alimentador da rede. Além disso, deve levar em consideração que, antes da interrupção, os *tap's* estavam ajustados na melhor posição para a carga conectada e que, depois da reenergização, as cargas pesadas que tenham sido desconectadas do alimentador serão, em determinado instante futuro de tempo, reinseridas no sistema.

Sendo assim, o método deve identificar a posição ótima dos *tap's* para o momento do restabelecimento, enviar um sinal para o equipamento para que os *tap's* dos reguladores sejam mudados da posição previamente ajustada para a posição ótima identificada e, posteriormente ao restabelecimento de energia, deve retornar, através do controle convencional dos reguladores, os *tap's* para a posição previamente ajustada antes da interrupção conforme as cargas voltem a ser conectadas ao alimentador. Com a aplicação do método para seleção ótima dos

tapes dos reguladores de tensão os níveis de tensão ao longo dos alimentadores devem ser mantidos em cumprimento com as normas e regulamentações vigentes.

A seleção ótima dos *tap's* dos bancos de reguladores de tensão para o novo perfil de cargas conectado no alimentador no momento do restabelecimento de energia deve ser identificada através da solução de uma formulação do Fluxo de Potência Ótimo - FPO do sistema.

O método proposto foi testado e validado em ambiente computacional, através de estudos de caso de sistemas de distribuição com as características do problema em questão (cargas pesadas com proteções locais, cargas leves, reguladores de tensão, etc.). Nos estudos de caso devem ser simuladas situações de faltas (interrupções de energia) em diferentes pontos de localização dos alimentadores com o intuito de avaliar os níveis de Variações de Tensão de Curta Duração gerados e o desempenho do método proposto nestas condições.

1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

No primeiro Capítulo está apresentada a Introdução, com os trabalhos desenvolvidos relacionados aos problemas de Qualidade de Energia Elétrica e mostrando a contextualização do tema da dissertação dentro do âmbito geral das diversas causas e efeitos desses problemas.

No Capítulo 2 estão apresentadas as definições e as normativas do tema “Qualidade de Energia Elétrica”, visando a classificação dos distúrbios gerados nas situações descritas nesta dissertação.

No Capítulo 3 está descrito o papel dos reguladores de tensão frente às solicitações de QEE, e, em particular, o funcionamento destes equipamentos e o controle empregado para a comutação de *tap's* nos mesmos.

No Capítulo 4 estão apresentados os conceitos do Fluxo de Potência Ótimo em redes de distribuição de energia elétrica. A formulação do método Primal-Dual de Pontos Interiores utilizado para solução do Fluxo de Potência Ótimo está apresentado no Apêndice A.

No Capítulo 5 apresenta-se o método desenvolvido para efetuar a seleção ótima de *tap's* de reguladores de tensão em situações de interrupção de energia.

O Capítulo 6 contém os estudos de caso e uma discussão dos resultados obtidos para avaliar e validar o método desenvolvido frente às solicitações tratadas na dissertação.

No Capítulo 7 e no Capítulo 8 estão apresentadas, por fim, respectivamente, as conclusões e os trabalhos futuros.

Resultados deste trabalho estão publicados (SANTOS *et al*, 2013) e, reproduzidos no Anexo A.

2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Dentre as diversas definições possíveis para o termo “Qualidade de Energia Elétrica” pode-se dizer que, de maneira geral, todas tratam da interação entre o fornecimento de energia elétrica e o consumidor, ou em termos técnicos, do sistema de potência e da carga conectada a este (BOLLEN, 2000). Uma destas definições, que retrata bem o problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestado na tensão, na corrente ou nas variações de frequência, que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores" (DUGAN, 2002).

Recentemente, nos últimos vinte anos, tem havido um aumento de interesse no tema de QEE, principalmente pelo agravamento destes problemas em todo o mundo por diversas razões, das quais pode-se destacar:

- Os equipamentos de consumidores residenciais têm se tornado cada vez mais sensíveis aos distúrbios de tensão;
- O novo perfil de equipamentos têm acarretado distúrbios de tensão na rede elétrica;
- As concessionárias necessitam entregar um “bom produto”;
- Passou-se a ter condições de medir os distúrbios de qualidade de energia.

Pode-se destacar também que, em função dessas e de mais uma série de razões que resultaram no incremento de estudos relacionados à QEE, surgiu uma necessidade crescente de critérios de padronização e desempenho de qualidade de energia elétrica.

Nesse quesito, embora a norma americana seja a mais antiga (IEEE 519, 1992), a norma europeia (EN50160, 1994) é a mais avançada e foi oficialmente adotada por vários países. Dentre as principais normas internacionais utilizadas pode-se citar:

- Norma EN50160 – *“Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”*. Esta norma, publicada pelo CENÉLEC (Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica), define, no ponto de fornecimento ao consumidor (PCC – *Point of Common Coupling*), as características principais da tensão para as redes públicas de abastecimento de energia em baixa e média tensão, tais como:

frequência, amplitude, forma de onda, variações de tensão, sobretensões, harmônicos e inter-harmônicos de tensão, simetria das tensões trifásicas, transmissão de sinais de informação pelas redes de energia.

- Norma ANSI/IEEE 519 – 1992 – De acordo com esta norma, as empresas distribuidoras são responsáveis pela manutenção da qualidade da tensão em todos os seus sistemas.
- IEC 61000-4 – é uma norma de medição de flicker e harmônicas, que inclui especificações para medidores.
- IEEE 1159 – 1995 – é uma prática recomendada pela IEEE para monitoramento e interpretação apropriada dos fenômenos que causam problemas de qualidade de energia.
- CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association*). A CBEMA propõe em (CBEMA, 2013) uma curva que define os níveis de suportabilidade de equipamentos, em função da magnitude da tensão e da duração do distúrbio. A motivação é estabelecer limites de tal forma que distúrbios que caiam fora da curva podem causar danos aos equipamentos.

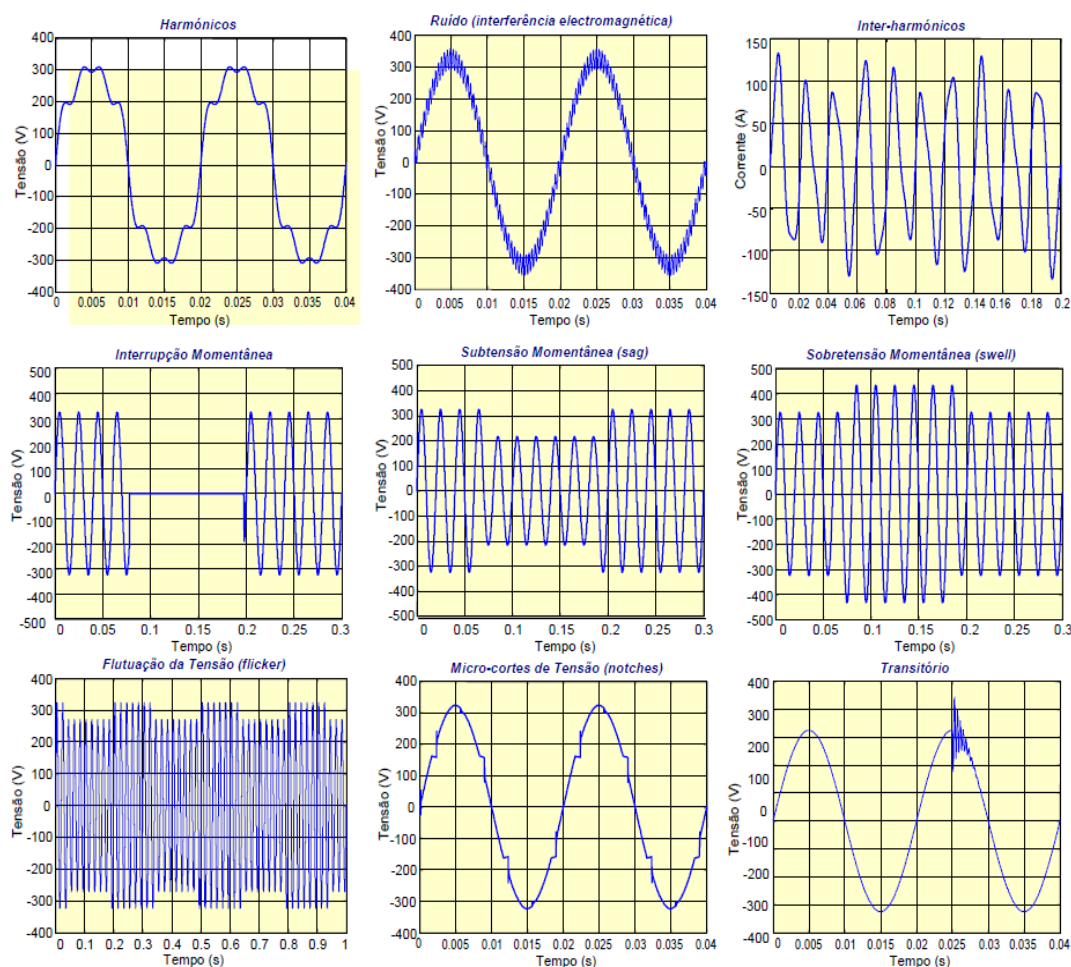
Nacionalmente, o módulo 8 do PRODIST, resolução normativa 469/2011 da ANEEL (ANEEL, 2011), estabelece os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica para rede de distribuição e aborda tanto a qualidade do produto como a qualidade do serviço prestado. Para a qualidade do produto, são caracterizados na resolução os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão. Estabelece também mecanismos que possibilitam à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Para a qualidade do serviço prestado, é estabelecida metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Nesse contexto, segundo as normas aplicadas para avaliação de itens de qualidade de energia elétrica, os diversos distúrbios que ocorrem em um sistema elétrico e que afetam a QEE são classificados principalmente em função da sua

duração e de sua intensidade. Os seguintes distúrbios são aqueles que normalmente estão presentes em sistemas elétricos:

- Transitórios;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variações de tensão de longa duração;
- Desequilíbrios de tensão;
- Distorção da forma de onda (harmônicos, ruídos, cortes, etc.);
- Flutuação de tensão;
- Variações de frequência.

A Figura 1 contém exemplos de formas de onda relacionadas com os itens de qualidade mais comuns no setor elétrico. A seguir, será apresentado um resumo dos tipos de distúrbios normalmente presentes no sistema elétrico, apresentando as suas características, causas e efeitos (IEEE STD. 446, 1995; IEEE STD. 1159, 2009; CARVALHO FILHO, 1997; ABREU *et al*, 1996; MARTZLOFF e GRUZS, 1988).



**Figura 1 – Formas de onda típicas de problemas de qualidade de energia elétrica
(AFONSO e MARTINS, 2004)**

2.1 TRANSITÓRIOS

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos provenientes de alterações súbitas nas condições operacionais do sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, entretanto com amplitude muito elevada, submetendo os equipamentos conectados ao sistema a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Os fenômenos elétricos transitórios podem ser classificados em dois tipos: impulsivos, causados principalmente por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos (DUGAN, 2002; ARRUDA, 2003). Aspectos de fenômenos transitórios e seus efeitos no sistema elétrico são abordados em (CIGRÉ, 2011).

2.1.1 Transitórios Impulsivos

Os transitórios impulsivos são também chamados de impulsos atmosféricos justamente por serem causados por descargas atmosféricas e podem ser definidos como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positivo ou negativo) e com alta frequência (CARVALHO, 1997).

Os transitórios impulsivos são considerados importantes pelo seu poder de comprometimento de sistemas elétricos. Dependendo da descarga elétrica submetida, os sistemas elétricos devem ser observados no ponto de ocorrência destes fenômenos, já que estes apresentam valores elevados de tensão, causando assim sobretensões nas linhas adjacentes ao sistema.

Estes tipos de transitórios apresentam tempos de subidas e descidas diferentes, podendo também ser expressos pelo seu conteúdo espectral. São usualmente representados por sinais com tempo de subida de $1,2 \mu\text{s}$ em um nível máximo de tensão, que decai para metade da tensão máxima de pico no tempo de $50 \mu\text{s}$. Na Figura 2 (DUGAN, 2002) é ilustrada uma forma de onda típica de um transitório impulsivo, proveniente de uma descarga atmosférica.

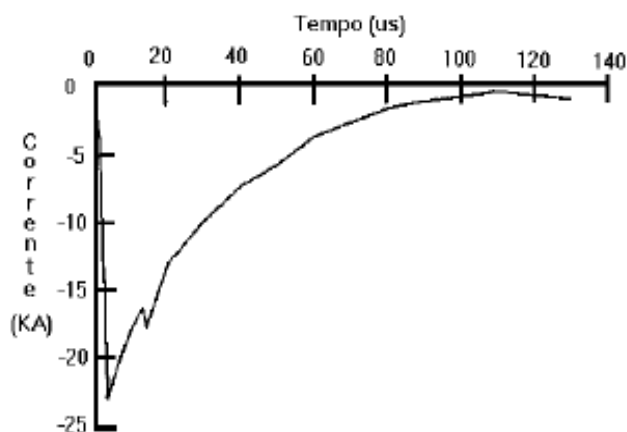


Figura 2 – Corrente transitória proveniente de uma descarga atmosférica (DUGAN, 2002)

Em sistemas de distribuição, o caminho mais provável para as descargas atmosféricas é através de um condutor fase, no primário ou no secundário, causando altas sobretensões no sistema. Uma descarga diretamente na fase pode gerar também subtensões de curta duração (*sags*) e interrupções.

Altas sobretensões transitórias podem também ser geradas por descargas que fluem ao longo do condutor terra, causando elevação do potencial terra local, em relação a outros “terras”. Equipamentos eletrônicos conectados entre duas referências de terra tais como computadores conectados a modems, podem ser danificados quando submetidos a altos níveis de tensão.

Em relação à ocorrência de descargas em locais de extra alta tensão, o surto se propaga ao longo da linha em direção aos seus terminais, podendo atingir os equipamentos instalados em subestações de manobra ou estações abaixadoras. Entretanto, no decorrer do percurso da onda de tensão, esta tem sua crista atenuada consideravelmente, tendendo a eliminar os efeitos oriundos de descargas atmosféricas ocorridas em nível de transmissão, em consumidores ligados em nível de baixa tensão. Contudo, os consumidores atendidos em tensão de transmissão, e supostamente localizados próximos ao ponto de descarga, estão sujeitos aos efeitos destes distúrbios, podendo ter os equipamentos de suas instalações danificados.

2.1.2 Transitórios Oscilatórios

Transitórios oscilatórios são caracterizados por alterações repentinas nas condições de regime permanente da tensão e/ou corrente possuindo valores de polaridade positiva e negativa. Estes transitórios normalmente são decorrentes de energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de forma geral, como de bancos de capacitores e transformadores.

Como o transitório impulsivo, o transitório oscilatório pode causar a queima ou danos em equipamentos eletroeletrônicos (CARVALHO FILHO, 1997; CIGRÉ, 2011).

A Figura 3 ilustra um exemplo do distúrbio transitório oscilatório (ARRUDA, 2003).

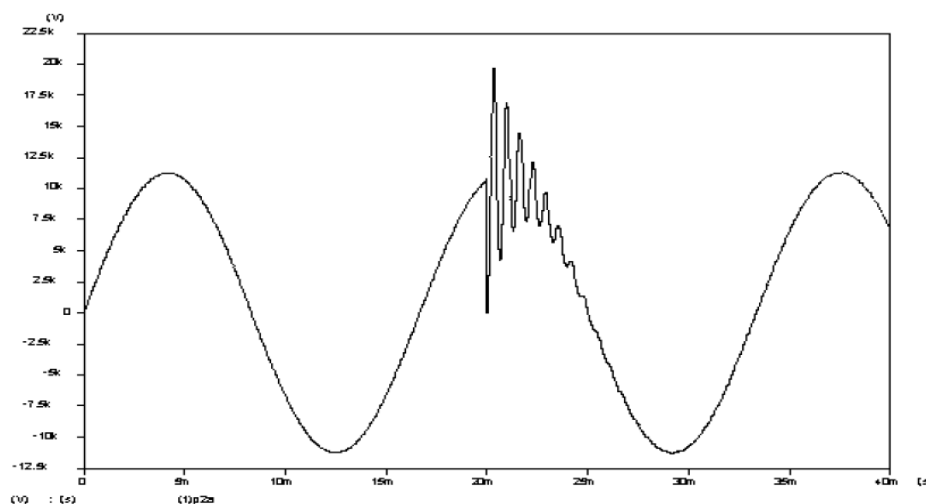


Figura 3 – Transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores (600 kvar, 13,8 kV) (ARRUDA, 2003)

2.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. As variações de curta duração podem ser classificadas como variações momentâneas ou temporárias, de acordo com a Tabela 1 (ANEEL, 2011).

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração (ANEEL, 2011)

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

As variações de tensão de curta duração são causadas principalmente por condições de falta, pela energização de grandes cargas que necessitem de grandes correntes de partida ou por falhas intermitentes nas conexões entre os sistemas elétricos. Dependendo da localização da falha e das condições do sistema, estes fenômenos podem causar afundamentos de tensão (*sags ou dips*), sobretensões elétricas (*swells*), ou uma interrupção de fornecimento de energia elétrica (IEEE STD. 519, 1992).

2.2.1 Interrupções de Curta Duração

O distúrbio da interrupção é caracterizado por haver um decréscimo na tensão maior do que 90% da tensão nominal por um período de tempo que não ultrapasse 3 minutos (EN 50160, 1994). Essas interrupções podem ser causadas por faltas nos sistemas de fornecimento de energia, falhas em equipamentos e mau funcionamento de aparelhos de controle (IEEE STD. 519, 1992).

As interrupções de energia causadas por faltas no sistema de fornecimento são determinadas pelo tempo de operação de dispositivos de proteção, que geralmente podem limitar as interrupções a momentâneas ou podem ser prolongadas por um tempo maior. Já as interrupções de energia causadas por mau funcionamento de equipamentos e por falhas nas conexões dos sistemas, geralmente são irregulares (KUSKO e THOMPSON, 2007). Entretanto, segundo pesquisas (LAMORRE et al, 1994; WAGNER et al, 1996; MACGRANAGHAN et al, 1993), a maior causa de faltas temporárias no sistema são as descargas atmosféricas (aproximadamente 77%).

A duração de uma interrupção é medida desde o momento em que a amplitude da tensão se torna inferior a 90% da tensão nominal (EN 50160, 1994). Geralmente a duração das interrupções é determinada pelo tempo de operação dos dispositivos de proteção da rede. Religadores programados para operar instantaneamente, na maioria das vezes, limitam a interrupção a tempos inferiores a 30 ciclos. Religadores temporizados podem gerar interrupções momentâneas ou temporárias, dependendo da escolha das curvas de operação do equipamento (OLIVEIRA, 2001).

Geralmente as interrupções são precedidas por afundamentos de tensão quando estas são causadas por falhas nos sistemas de fornecimento de energia. Os afundamentos de tensão, ou *sags*, ocorrem entre o tempo do início da falta de energia e o início da operação dos sistemas de proteção. Na Figura 4 está ilustrada uma interrupção de energia precedida de um afundamento de tensão de 3 ciclos, com um decréscimo na amplitude de tensão em torno de 80% do valor de tensão nominal (ARRUDA, 2003).

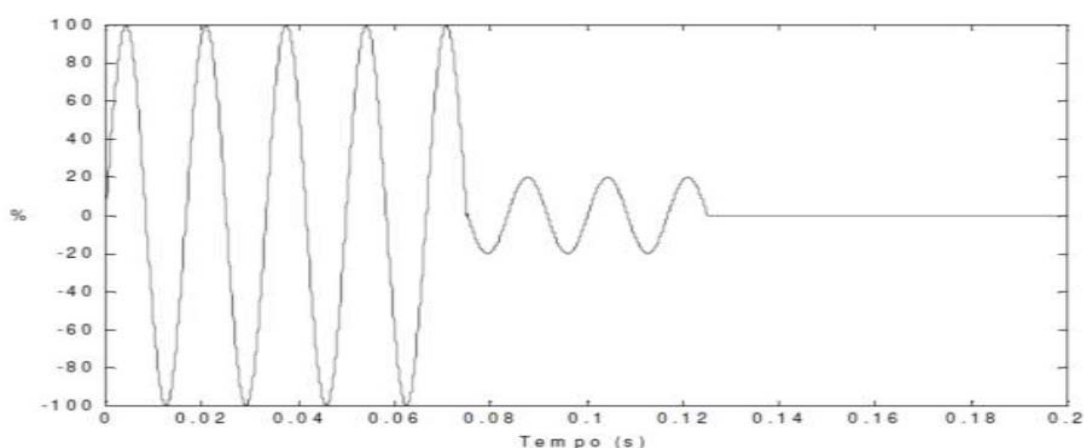


Figura 4 – Interrupção precedida de um afundamento de tensão (ARRUDA, 2003)

De um modo geral, as interrupções quase sempre causam o desligamento ou mau funcionamento dos equipamentos eletroeletrônicos. Em alguns casos, podem até causar defeitos em chaves estáticas (*Soft-starter*) e, dependendo da duração da interrupção, podem promover o desligamento de todos os equipamentos, com exceção daqueles que possuem suprimento alternativo de energia (CARVALHO, 1997).

2.2.2 Afundamentos de Tensão

Os afundamentos de tensão de curta duração são caracterizados por apresentarem um decréscimo no valor eficaz da tensão, com a duração entre 0,5 ciclo e cerca de 3 minutos (EN 50160, 1994).

A comunidade científica que desenvolve trabalhos de qualidade de energia elétrica tem utilizado o termo *sag* para denominar os afundamentos de tensão durante vários anos. Este termo é bastante difundido entre as instituições, empresas e usuários de energia elétrica (BOLLEN, 2000).

Esses distúrbios geralmente estão associados às faltas no sistema de fornecimento de energia, mas podem também ser causados pela energização de grandes cargas, pela partida de grandes motores, ou pela corrente *inrush* de um transformador (ARRUDA, 2003).

Em relação à partida de grandes motores, os afundamentos de tensão são gerados em função da necessidade destes equipamentos de uma corrente de partida alta, da ordem de 5 a 8 vezes a corrente nominal, resultando em uma queda significativa da tensão de fornecimento (DUGAN, 2002; WEG ELETROMOTORES, 1990). Na Figura 5 (DUGAN, 2002) pode-se observar o afundamento de tensão causado pela partida de um motor de indução.

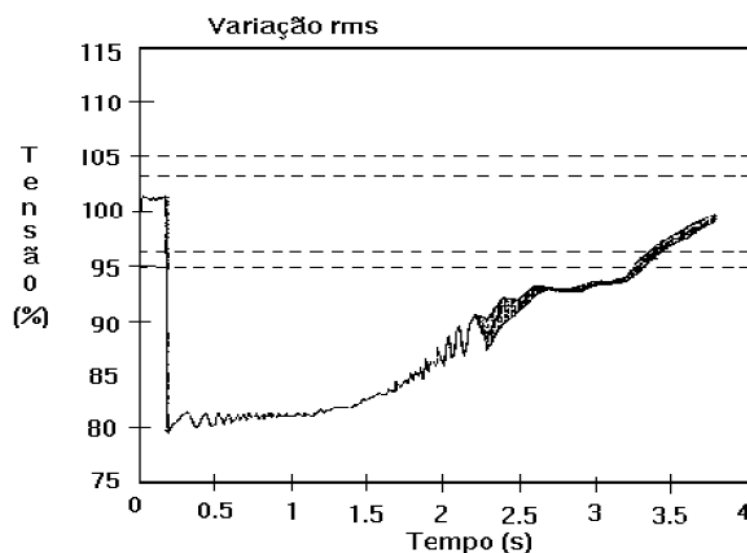


Figura 5 – Decréscimo da tensão ocorrido pela partida de um motor (DUGAN, 2002)

Apontadas em pesquisas como a principal origem do afundamento de tensão as faltas no sistema elétrico podem ocorrer tanto dentro das indústrias como no sistema de alimentação da concessionária. As características do afundamento de tensão diante de uma determinada falta dependem de vários fatores como a natureza da falta, sua posição relativa a outros consumidores e o tipo de filosofia de proteção adotada no sistema (ARRUDA, 2003). Na Figura 6 pode-se observar um exemplo de um afundamento de tensão de curta duração típico, causado por uma falta fase-terra (DUGAN, 2002). Verifica-se, neste exemplo, uma queda de 80% na tensão por um período de aproximadamente 3 ciclos, até que o equipamento de proteção da subestação atue e elimine a corrente de falta.

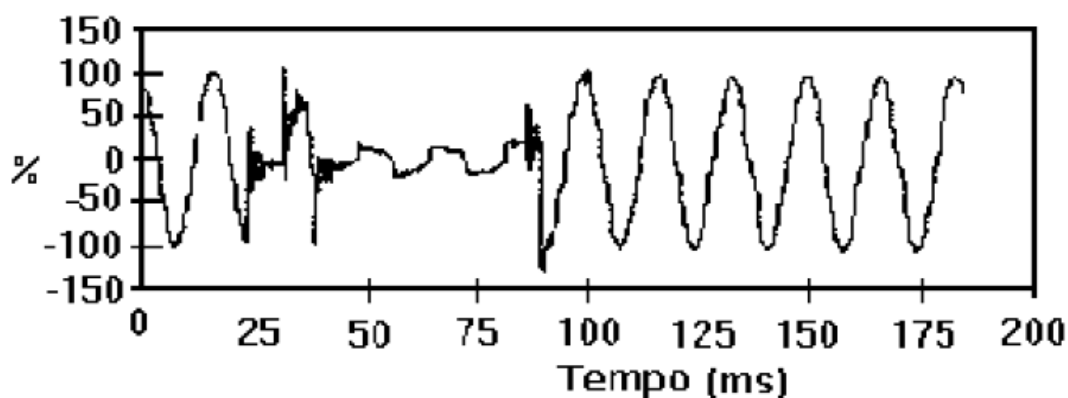


Figura 6 – Afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra (DUGAN, 2002)

Os afundamentos de tensão podem causar o aumento das perdas por aquecimento em motores de indução, parada de operação de dispositivos eletrônicos e desligamento de sistemas de comando de motores.

Atualmente, processos industriais inteiros são interrompidos devido à ocorrência da depressão de tensão. Este distúrbio da QEE traz como consequência, na maioria das vezes, perdas de produção, perdas de especificação de produtos, perdas devido ao tempo de espera para o reinício da operação do sistema e retomada plena da produção e, finalmente, perdas devido aos reparos dos equipamentos danificados. Os custos, associados à ocorrência deste distúrbio, são altos, o que tem despertado grande atenção dos profissionais de engenharia, que atuam tanto na indústria como nas empresas de energia elétrica (CARVALHO, 1997).

Algumas medidas que podem ser destacadas com o intuito de reduzir o número e a severidade dos afundamentos de tensão de curta duração são: utilização de transformadores ferroressonantes (*Constant Voltage Transformers*), utilização de conjuntos motor-gerador, utilização de dispositivos magnéticos supercondutores de armazenamento de energia, utilização de métodos para partida de motores, adoção de medidas de prevenção contra faltas no sistema da concessionária, melhorias nas práticas para o restabelecimento do sistema da concessionária em caso de faltas, entre outras.

2.2.3 Elevações de Tensão

A elevação de tensão é caracterizada por um acréscimo no valor eficaz da tensão com duração entre 0,5 ciclo e cerca de 3 minutos (EN 50160, 1994). Estes distúrbios também são chamados de saltos de tensão (*voltage swell*) na literatura (BOLLEN, 2000).

As elevações de tensão, assim como os afundamentos de tensão, são geralmente causadas pelas condições de falta no sistema, desligamento de grandes blocos de cargas e a energização de banco de capacitores (DUGAN, 2002). No caso de faltas fase-terra no sistema, ou seja, curtos-circuitos fase-terra, as fases não defeituosas experimentam uma elevação de tensão. Esta elevação de tensão pode atingir, em um sistema 4 fios multi-aterrado, valores próximos a 1,25 pu (OLIVEIRA, 2001). A ocorrência de saltos de tensão ocorre na maioria das vezes por causa das faltas fase-terra do que por outras causas (ARRUDA, 2003; KUSKO e THOMPSON, 2007).

Na Figura 7, pode-se observar uma elevação instantânea do valor eficaz rms (*Root Mean Square*) da tensão causado por uma falta fase-terra. Verifica-se também que o valor da tensão, neste caso, chega a ser 15% maior do que o valor de tensão normal de funcionamento do sistema elétrico (KUSKO e THOMPSON, 2007).

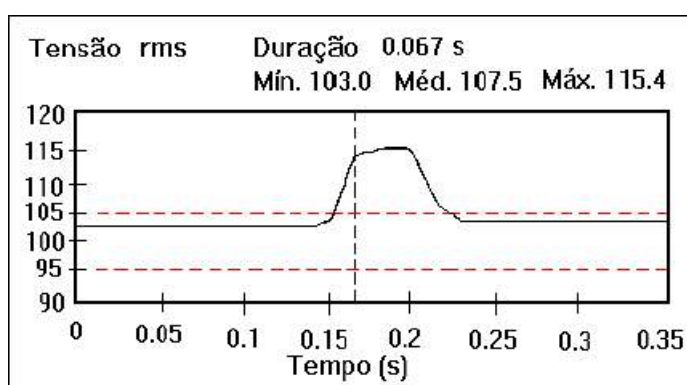


Figura 7 – Elevação instantânea do valor rms da tensão
(adaptado de: KUSKO e THOMPSON, 2007)

Pode-se dizer que a severidade de uma elevação de tensão durante uma condição de falta se dá em função do local da falta, da impedância do sistema e do aterramento do mesmo (DUGAN, 2002). A duração destes distúrbios está diretamente relacionada aos ajustes dos dispositivos de proteção. Em situações de elevação de tensão oriundas de saídas de grandes cargas ou energização de

grandes bancos de capacitores, o tempo de duração das sobretensões depende da resposta dos dispositivos reguladores de tensão das unidades geradoras, do tempo de resposta dos transformadores de *tap* variável e da atuação dos dispositivos compensadores que porventura existam no sistema (ARRUDA, 2003).

Como consequência das sobretensões de curta duração, pode-se citar falhas dos componentes de equipamentos eletrônicos, dependendo da frequência de ocorrência do distúrbio. Dispositivos eletrônicos, incluindo computadores e controladores eletrônicos, podem apresentar falhas imediatas durante estas condições. Além disso, transformadores, cabos, barramentos, dispositivos de chaveamento, TP's, TC's e máquinas rotativas podem ter a vida útil reduzida. Já um aumento de curta duração na tensão em alguns relés pode resultar na má operação destes dispositivos e, uma elevação de tensão em um banco de capacitores, pode causar danos nestes equipamentos.

Diante de tais problemas causados por sobretensões de curta duração, este item de qualidade de energia sugere que seja mantida uma atenção por parte de consumidores, fabricantes e concessionárias, no intuito de eliminar ou reduzir as consequências oriundas deste fenômeno. Este é um aspecto de particular relevância dentro do contexto desta dissertação.

2.3 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO

O módulo referente à qualidade de energia elétrica da resolução normativa nacional vigente (ANEEL, 2011) estabelece os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, conforme pode ser verificado na Tabela 2 e na Figura 8, onde os valores base de tensão de referência correspondem à tensão nominal ou à tensão contratada. Na Figura 8, a faixa verde corresponde à Tensão de Atendimento adequada, a faixa amarela à Tensão de Atendimento precária e a faixa vermelha à Tensão de Atendimento considerada crítica.

Tabela 2 – Classificação dos níveis de tensão padronizados entre 1 kV e 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93 \text{ TR} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ TR}$
Precária	$0,90 \text{ TR} \leq \text{TL} < 0,93 \text{ TR}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90 \text{ TR}$ ou $\text{TL} > 1,05 \text{ TR}$



Figura 8 – Níveis de tensão padronizados entre 1 kV e 69 kV

A resolução normativa 469/2011 da ANEEL (ANEEL, 2011) estabelece também os indicadores individuais e coletivos para mensurar a transgressão da tensão de fornecimento em relação aos níveis de tensão padronizados. Transcorridos os prazos normais para a regularização da não conformidade, e não havido regularização dos níveis de tensão nos prazos estipulados, a concessionária distribuidora deve compensar as unidades consumidoras que estiveram submetidas a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores estabelecidos.

Variações do valor eficaz da tensão acima ou abaixo dos limites que definem os níveis de tensão críticos com duração superior a 3 minutos (EN 50160, 1994) caracterizam os distúrbios de variações de tensão de longa duração, dentro dos conceitos aplicados à qualidade de energia elétrica, tais como: sobretensões, subtensões ou interrupções sustentadas.

2.3.1 Interrupções Sustentadas

Caracteriza-se como interrupção sustentada o decaimento da tensão de fornecimento à zero por um período superior à 3 minutos (EN 50160, 1994). As interrupções sustentadas podem ocorrer tanto por manutenções programadas quanto por manutenções emergenciais do sistema elétrico. Em ambos os casos, são determinados no módulo 8 dos procedimentos de distribuição da ANEEL os indicadores de continuidade, através dos quais pode-se avaliar a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico.

Interrupções causadas por manutenções programadas, geralmente são ocasionadas em função de serviços como troca de cabos, implantação de postes, manutenção em transformadores, ajustes nos equipamentos de proteção, entre outros motivos (ARRUDA, 2003). Já interrupções causadas por manutenções emergenciais, que se tratam da grande maioria, são ocasionadas, por exemplo, por falhas em equipamentos do circuito, queima de fusíveis, entre outros. Tais interrupções sustentadas geralmente necessitam da intervenção humana (manual) para restabelecimento da energia elétrica do sistema.

Entre as empresas concessionárias, existe uma preocupação muito grande em causar o menor impacto com esses tipos de fenômenos. Por isso, as concessionárias objetivam o menor número possível de ocorrência de interrupções, justamente para não prejudicar o usuário. Também se preocupam em que essas interrupções sustentadas durem o menor tempo possível, para não prejudicar nenhum serviço de importância do usuário. E por último, é necessário prever que o menor número de consumidores de energia seja afetado por este distúrbio (ARRUDA, 2003).

Os efeitos de uma interrupção sustentada vão desde o desligamento total de equipamentos até possíveis danos no processo de restabelecimento de energia nestes equipamentos. Equipamentos que executam tarefas críticas, como servidores e equipamentos hospitalares, são protegidos por um sistema de fornecimento de energia alternativo. Isto é, estes equipamentos são ligados aos sistemas de *nobreak* e outros sistemas de armazenamento de energia (ARRUDA, 2003).

2.3.2 Sobretensões Sustentadas

As sobretensões sustentadas ocorrem quando a tensão eficaz apresenta valores de 1,1 a 1,2 pu durante um tempo superior a 3 minutos (EN 50160, 1994). Geralmente são originadas devido à saída de grandes blocos de carga, entrada de banco de capacitores e também ao ajuste incorreto de *tap's* de transformadores (IEEE 1159, 1995).

Outro fator que muitas vezes acarreta na geração de sobretensões sustentadas é a instalação de bancos de capacitores fixos, tanto nos sistemas de distribuição das concessionárias, para suprir a energia reativa, quanto em indústrias, para correção do fator de potência. Em horários de ponta, quando há grandes solicitações de carga, a potência fornecida por estes bancos auxilia nos objetivos pretendidos com a instalação destes equipamentos, entretanto, no horário fora de ponta de carga, tem-se um excesso de reativo injetado no sistema, o qual se manifesta por uma elevação de tensão.

Em relação às consequências das elevações de tensão de longa duração, estas podem resultar em falha dos equipamentos. Transformadores, cabos, disjuntores, TC's, TP's e máquinas rotativas, embora geralmente não apresentem falhas imediatas quando submetidos a sobretensões, poderão ter sua vida útil reduzida quando submetidos a estes distúrbios por longo período de tempo. Relés de proteção também poderão apresentar falhas de operação durante as elevações de tensão. Nos bancos de capacitores, a potência reativa fornecida por eles aumenta com o quadrado da tensão em uma condição de sobretensão, podendo ocorrer o estufamento do invólucro das unidades capacitivas. Um conjunto de iluminação (lâmpadas resistivas) também pode ter a sua luminosidade aumentada devido às sobretensões de longo período e assim propiciar a falha deste conjunto (DUGAN, 2002; KUSKO e THOMPSON, 2007).

Atualmente, diversas soluções têm sido utilizadas por empresas, concessionárias e usuários domésticos visando reduzir os efeitos provenientes das sobretensões sustentadas. Dentre essas, destaca-se a troca de bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, tanto em sistemas de concessionárias como em sistemas industriais e a instalação de compensadores estáticos de reativos, possibilitando um controle maior do nível de tensão.

2.3.3 Subtensões Sustentadas

Definem-se os distúrbios de subtensões sustentadas como um decréscimo no valor da tensão eficaz para 0,8 a 0,9 pu, na frequência do sistema, por um período de duração superior a 3 minutos (EN 50160, 1994).

A entrada de grandes cargas ou a saída de bancos de capacitores podem provocar subtensões no sistema elétrico. Uma sobrecarga nos circuitos alimentadores também pode causar subtensões no sistema. Isto ocorre devido aos níveis de corrente que os circuitos são submetidos que, interagindo com a impedância do sistema, originam quedas de tensão acentuadas por um longo período de tempo (KUSKO e THOMPSON, 2007). Entretanto, as subtensões sustentadas são decorrentes principalmente do carregamento excessivo dos circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente que, interagindo com a impedância da rede, dão origem a quedas de tensão acentuadas. Outro fator que contribui para as subtensões é o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão (ARRUDA, 2003).

As subtensões causam o aumento das perdas por aquecimento em motores de indução e conseqüentemente redução da vida útil destes equipamentos, possível interrupção da operação de dispositivos eletrônicos sensíveis, desligamento de sistemas de comando de motores, além de redução do nível de iluminação dos circuitos de lâmpadas incandescentes provocando insatisfação aos consumidores.

Como soluções para os problemas de afundamentos de tensão sustentados, para regulação da tensão, empregam-se reguladores de tensão, equipamentos nos quais a comutação de *tap's* ocorre de maneira a fornecer o controle de tensão adequado. Utilizam-se também a instalação de capacitores shunt para redução da corrente e a troca de cabos por outros de bitolas maiores para reduzir a impedância total nas linhas dos sistemas.

2.4 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado às alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. É definido como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual (ANEEL, 2011). Ou ainda, o desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as fases apresentam tensão com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120 graus ou, ainda, as duas condições simultaneamente (ANEEL, 2011).

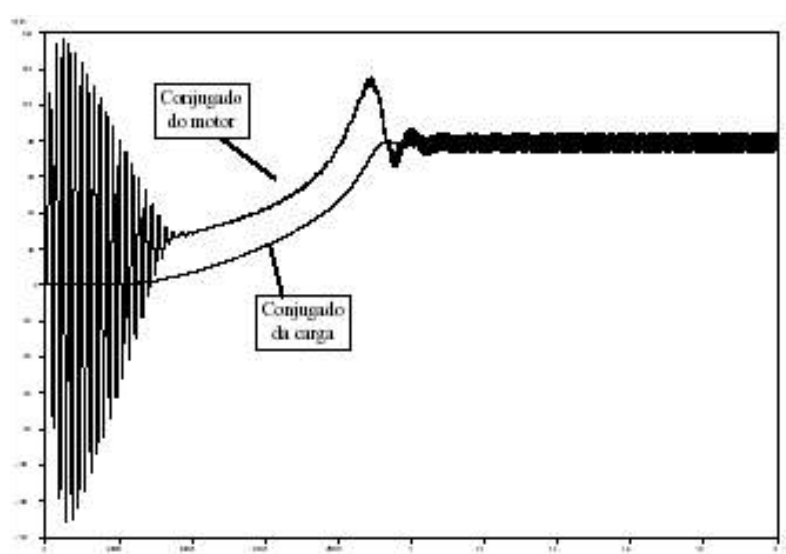
As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem alimentadores extensos com tronco principal trifásico e ramais monofásicos com cargas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária.

Tais fatores fazem com que a qualidade no fornecimento de energia seja prejudicada, e alguns consumidores tenham em suas alimentações um desequilíbrio de tensão. Estes desequilíbrios de tensão podem apresentar problemas indesejáveis na operação de equipamentos, dentre os quais se destacam:

- **Motores de Indução:** Para as análises dos efeitos de tensões desequilibradas aplicadas a um motor de indução, consideram-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de sequência negativa, que somados às tensões de sequência positiva, resultam num conjugado pulsante no eixo da máquina (conforme Figura 9), e em sobreaquecimento da máquina. Como consequência direta desta elevação de temperatura tem-se a redução da expectativa de vida útil dos motores, visto que o material isolante sofre uma deterioração mais acentuada na presença de elevadas temperaturas nos enrolamentos.
- **Máquinas síncronas:** Como em motores de indução, a corrente de sequência negativa fluindo através do estator de uma máquina síncrona, cria um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, porém, no sentido contrário ao de rotação definido pela

sequência positiva. Consequentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, de amortecimento e na superfície do ferro do rotor, terão uma frequência igual a duas vezes à da rede, aumentando significativamente as perdas no rotor.

- Retificadores: Uma ponte retificadora CA/CC, controlada ou não, injeta na rede CA, quando esta opera sob condições nominais, correntes harmônicas características. Entretanto, quando o sistema supridor encontra-se desequilibrado, os retificadores passam a gerar, além das correntes harmônicas características, o terceiro harmônico e seus múltiplos. A presença do terceiro harmônico e seus múltiplos no sistema elétrico é extremamente indesejável, pois possibilita manifestação de ressonâncias não previstas, causando danos a uma série de equipamentos.



**Figura 9 – Resposta de um motor de indução à alimentação desequilibrada
(KUSKO e THOMPSON, 2007)**

Além disso, os próprios equipamentos das concessionárias, por exemplo, transformadores de distribuição trifásicos, quando submetidos a regimes de operação com desequilíbrio acentuado entre fases, têm sua vida útil reduzida, uma vez que o enrolamento da fase mais carregada fica sujeito a temperaturas de operação mais elevadas em comparação com aquelas que seriam propiciadas pela corrente média das três fases, caso houvesse equilíbrio entre estas.

O desequilíbrio de carregamento é bastante comum e frequentemente encontrado nas redes de distribuição nacionais. Conforme indicado, suas consequências não são interessantes nem para os consumidores nem para as concessionárias de energia elétrica.

2.5 DISTORÇÕES DA FORMA DE ONDA

Define-se distorção da forma de onda como um desvio, em regime permanente, da forma de onda da corrente ou tensão em relação ao sinal senoidal puro na frequência fundamental.

Os principais tipos de distorções da forma de onda são:

- Desvio do Nível de Corrente Contínua (CC);
- Harmônicos;
- Inter-harmônicos;
- Cortes (Notches);
- Ruídos.

2.5.1 Desvio do Nível de Corrente Contínua (CC)

A presença de corrente contínua em sistemas de corrente alternada – CA é denominada de Desvio no Nível de CC e pode ocorrer devido ao efeito da retificação de meia onda. O desvio no nível de CC em redes de corrente alternada pode ocasionar a saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e consequentemente redução da vida útil destes equipamentos. Além disso, pode provocar também corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores (DUGAN, 2002) da rede elétrica.

2.5.2 Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais múltiplas inteiras da frequência fundamental de operação do sistema de energia elétrica (IEEE 1159, 1995; CARVALHO FILHO, 1997; MARTZLOFF e GRUZS, 1988). Os harmônicos se somam às componentes fundamentais de tensão e corrente causando distorção na forma de onda.

Para ilustrar as distorções na forma de onda em função de harmônicos, na Figura 10 veem-se duas curvas, uma onda senoidal normal, representando a tensão do sistema, e outra onda menor, representando uma harmônica. Esta segunda onda menor representa a harmônica de quinta ordem, o que significa que sua frequência é de 5×60 Hz, ou 300 Hz. Na Figura 11, vê-se a soma das duas curvas apresentadas na Figura 10. Esta curva resultante mostra a distorção harmônica da curva de tensão, na presença de harmônicas.

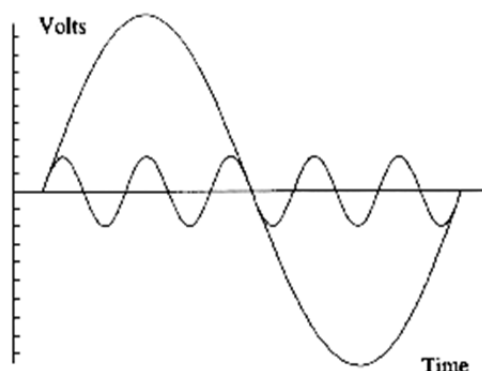


Figura 10 – Onda senoidal de tensão e onda da quinta harmônica

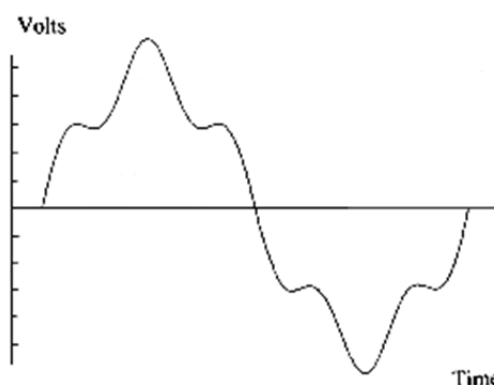


Figura 11 – Distorção harmônica da onda de tensão com a presença da quinta harmônica

A distorção harmônica ocorre devido à presença de cargas não lineares no sistema elétrico, tais como: fornos a arco, fornos de indução, conversores estáticos, máquinas de solda, lâmpadas fluorescentes, etc.

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais, de acordo com a resolução normativa (ANEEL, 2011) estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais
(em porcentagem da tensão fundamental)**

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$	3

Os efeitos da corrente harmônica e da distorção da tensão podem provocar no sistema:

- Sobreaquecimento em máquinas rotativas e transformadores, com consequente redução da vida útil destes equipamentos;
- Sobretensões harmônicas, resultando no aumento das solicitações do isolamento dos dispositivos, o que, em muitos casos, causa a ruptura do dielétrico;
- Operação indevida dos sistemas de proteção, medição e controle de equipamentos elétricos;
- Operação incorreta de diversos equipamentos, tais como, microcomputadores, medidores de energia elétrica e controles microprocessados.

Os principais problemas causados por harmônicos, no entanto, se dão junto a bancos de capacitores, que podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas. Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, e em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo ponto ficam submetidos a tensões perigosas, mesmo não sendo portadores de cargas poluidoras em sua instalação. Mesmo sem uma condição de ressonância, um capacitor é sempre um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, e estará sujeito a sobrecarga e sobreaquecimento excessivo.

2.5.3 Inter-harmônicos

Inter-harmônicos são componentes de frequência, nas ondas de tensão ou corrente, assim como os harmônicos, entretanto, não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema de fornecimento.

Estes distúrbios podem aparecer como frequências discretas ou com larga faixa espectral e são encontrados em redes de diferentes classes de tensão. São originados principalmente por conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco.

2.5.4 Ruídos

Ruído é o fenômeno definido como um sinal elétrico indesejável que contém um amplo espectro com frequências menores que 200 kHz superpostas às ondas de tensão ou corrente de fase, ou encontradas em condutores de neutro. A faixa de frequência e o nível da amplitude do ruído dependem da fonte que o produziu e das características do sistema.

Geralmente estes distúrbios são causados pela operação defeituosa de equipamentos no sistema da concessionária ou dos próprios consumidores e, via de regra, estão associados a aterramentos impróprios.

As consequências dos ruídos nas ondas de tensão ou corrente são observadas em equipamentos eletrônicos como microcomputadores e controladores programáveis (IEEE 1159, 1995; CARVALHO FILHO 1997; ABREU *et al*, 1996). O problema pode ser minimizado com a utilização de filtros e transformadores isolados, entre outros (DUGAN, 2002).

2.5.5 Cortes (*Notches*)

Cortes são distúrbios que ocorrem quando a corrente é comutada de uma fase para outra em equipamentos de eletrônica de potência, durante sua operação normal. Nestes casos, ocorre um curto-circuito momentâneo entre as duas fases. Os principais equipamentos geradores destes distúrbios são os conversores trifásicos (IEEE 1159, 1995).

As componentes de frequência associadas aos cortes são de alto valor e, desta maneira, não podem ser medidas por equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica.

2.6 FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, a destacar:

- Flutuações Aleatórias: causadas por fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material e do nível de curto-circuito da instalação;
- Flutuações Repetitivas: causadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias;
- Flutuações Esporádicas: causadas pela partida direta de grandes motores.

Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das flutuações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção, e efeito "flicker" ou cintilação luminosa.

O fenômeno flicker consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão. Este tema merece especial atenção, uma vez que o desconforto visual associado à perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda sua extensão, indesejável (ARRUDA, 2003).

2.7 VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60 Hz). A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração

no caso de alguma alteração nestas (variações na faixa de $60 \pm 0,5$ Hz). Variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

Em sistemas isolados, como é o caso da geração própria nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Esse capítulo apresentou de forma introdutória os conceitos e definições sobre QEE. A Tabela 4 apresenta um resumo das categorias, duração e magnitudes para os distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica.

Tabela 4 – Classificação Geral dos Distúrbios de QEE

Categorias	Distúrbios	Duração	Magnitude
Transitórios	Impulsivos	5 ns - 1 ms	
	Oscilatórios	5 μ s - 50 ms	0,0 - 0,4 pu
Variações de Curta Duração	Interrupções	0,5 ciclo - 3 min.	< 0,1 pu
	Afundamentos de Tensão	0,5 ciclo - 3 min.	0,1 - 0,9 pu
	Elevações de Tensão	0,5 ciclo - 3 min.	> 1,1 pu
Variações de Longa Duração	Interrupções Sustentadas	> 3 min.	0,0 pu
	Subtensões	> 3 min.	0,8 - 0,9 pu
	Sobretensões	> 3 min.	1,1 - 1,2 pu
Desequilíbrios de Tensão	-	estado permanente	0,01 - 0,02 pu
Distorção da Forma de Onda	Desvio do Nível de Corrente Contínua (CC)	estado permanente	0,0 - 0,001 pu
	Harmônicos	estado permanente	0,0 - 0,2 pu
	Inter-harmônicos	estado permanente	-
	Cortes (Notches)	estado permanente	-
	Ruídos.	estado permanente	0,0 - 0,01 pu
Flutuações de Tensão	-	intermitente	0,001 - 0,07 pu
Variações de Frequência	-	< 10 s	-

Dentro do contexto exposto da relevância da Qualidade de Energia para o setor elétrico, neste trabalho são tratados os distúrbios que ocorrem após interrupções de energia elétrica. Especificamente, são tratadas as elevações de tensão de curta duração que são geradas em função do ajuste inadequado dos *tap's* dos reguladores de tensão no momento do restabelecimento de energia em alimentadores de distribuição quando estes não possuem mais o mesmo perfil de cargas conectadas anteriormente à interrupção.

3 REGULADORES DE TENSÃO

Dentro do contexto da qualidade de energia elétrica, os reguladores de tensão com comutação de *tap's* sob carga são uma parte essencial dos modernos sistemas de energia. São equipamentos empregados com o intuito de permitir a manutenção da tensão de alimentação das cargas dentro dos níveis desejados, e assim evitar a violação dos níveis de tensão estabelecidos como adequados em regime permanente (CARTER, 1989; RODRIGUES, 2007).

Reguladores de tensão são equipamentos muito empregados em sistemas de distribuição em alimentadores urbanos e rurais. Estão instalados tanto em subestações, quanto em pontos estratégicos da rede de média tensão. Em alimentadores extensos, muitas vezes são utilizados até três bancos de reguladores de tensão conectados em série para o ajuste e correção da tensão aplicada ao longo do alimentador.

Quando reguladores de tensão não são instalados ao longo de alimentadores, a queda de tensão máxima deve estar dentro da faixa de operação do transformador instalado na subestação. O local onde o transformador da subestação já não é mais capaz de compensar a queda de tensão no alimentador é chamado de *Ponto de Queda de Tensão*. Para que a tensão não fique fora dos limites estabelecidos pela legislação vigente, a partir deste ponto, é necessária a instalação de um regulador de tensão, que eleva os níveis de tensão novamente para os níveis limites estabelecidos como adequados. Na Figura 12 está ilustrada a ação de um regulador de tensão instalado ao longo de um alimentador de distribuição (SHORT, 2003).

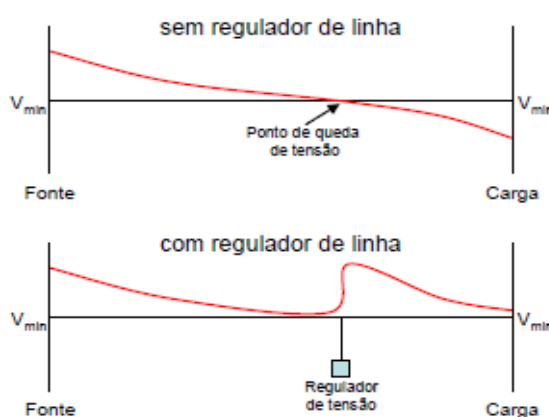


Figura 12 – Alimentador de distribuição com e sem regulador de tensão (RODRIGUES, 2007)

Além das razões técnicas que justificam o uso de reguladores de tensão, economicamente, seu uso também é justificado. Pois, além de permitir às concessionárias manterem um bom serviço de suprimento aos consumidores, aumenta-se a tensão média no ponto de utilização e conseqüentemente, o consumo. Segundo (ALVES, 2005) o aumento de 1% na tensão de um consumidor resulta num acréscimo de faturamento de cerca de 1,5%.

Na Figura 13 pode-se visualizar um banco de reguladores de tensão instalado ao longo de um alimentador de distribuição.



Figura 13 – Banco de reguladores de tensão instalado em um alimentador de distribuição
(Fonte: O Autor 2012)

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Reguladores de tensão são, basicamente, autotransformadores. Autotransformadores são semelhantes a transformadores convencionais com dois enrolamentos, exceto que os enrolamentos se apresentam conectados eletricamente em um ponto. O enrolamento que é comum tanto ao circuito de entrada como ao circuito de saída é denominado enrolamento comum. O enrolamento que não é

comum a esses circuitos, mas aparece conectado em série entre os circuitos de entrada e saída é denominado de enrolamento série.

Existem, basicamente, três tipos de reguladores de tensão: Regulador *Autobooster*, Regulador tipo *Line-Drop Compensation* – LDC e Regulador de 32 Degraus. Dentre estes, o regulador de 32 Degraus é o mais utilizado pelas concessionárias de energia elétrica, e para fins desta dissertação, o enfoque será direcionado a este equipamento. Este regulador permite obter uma tensão constante e pré-determinada em um ponto do sistema.

3.1.1 Circuito Mecânico

Um regulador de tensão pode tanto elevar como abaixar a tensão nos seus terminais de saída. Quando este opera como redutor de tensão, na ocorrência de uma variação de tensão na fonte que cause uma elevação de tensão na carga, a regulação atua mantendo a mesma tensão que existia antes da ocorrência do fenômeno. A Figura 14 (FELÍCIO, 2006) apresenta a configuração do regulador como redutor de tensão.

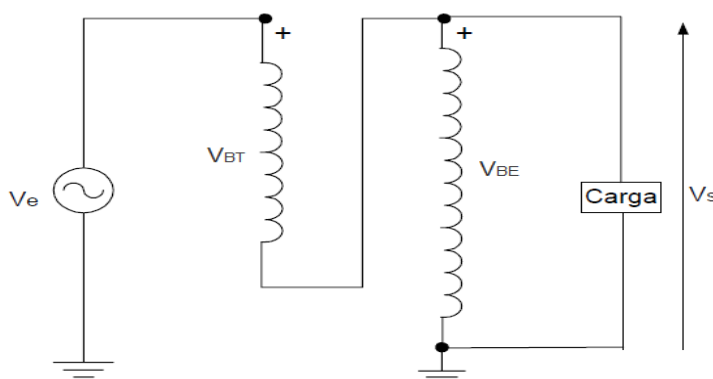


Figura 14 – Ligação para redução de tensão (FELÍCIO, 2006)

Neste caso, a tensão de saída é fornecida pela equação (1) a seguir.

$$\dot{V}_S = \dot{V}_{BE} = \dot{V}_e - \dot{V}_{BT} \quad (1)$$

onde:

\dot{V}_e – tensão de entrada;

\dot{V}_S – tensão de saída;

\dot{V}_{BT} – tensão na bobina de *tap's* ou enrolamento série;

\dot{V}_{BE} – tensão na bobina de excitação ou enrolamento comum.

Operando como elevador de tensão o regulador conserva o mesmo nível de tensão anterior a qualquer variação que proporcione queda de tensão na carga. Esta configuração pode ser verificada na Figura 15.

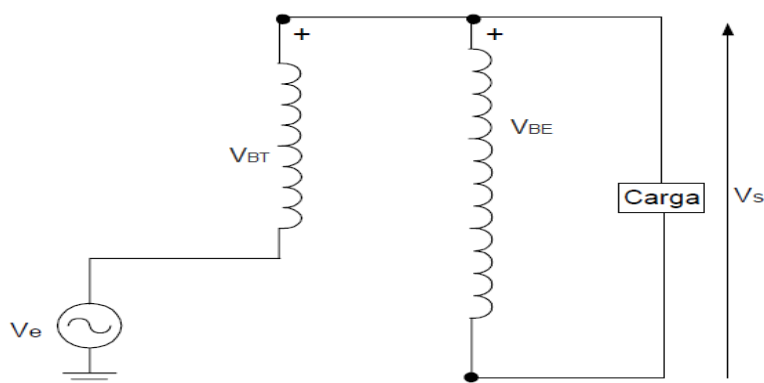


Figura 15 – Ligação para elevação de tensão (FELÍCIO, 2006)

A tensão de saída na configuração de elevação de tensão do regulador de tensão é dada pela seguinte equação (2):

$$\dot{V}_S = \dot{V}_{BE} = \dot{V}_e + \dot{V}_{BT} \quad (2)$$

Pode-se verificar na Figura 14 e na Figura 15 que a operação do regulador como redutor ou elevador de tensão é determinada pela polaridade da conexão entre o enrolamento série e o enrolamento comum. Na prática, reguladores de tensão possuem as duas funções operando paralelamente, e, para isso, é utilizada uma chave reversora no circuito destes equipamentos, conforme pode ser verificado na Figura 16 (SZUVOVIVSKI, 2008).

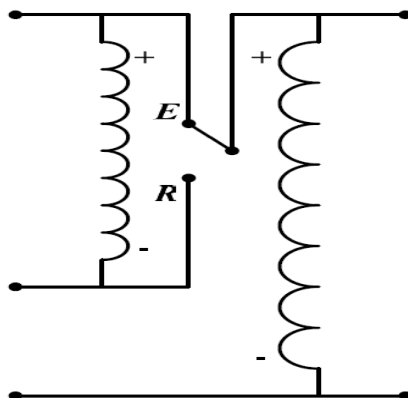


Figura 16 – Chave reversora do circuito do regulador de tensão (SZUVOVIVSKI, 2008)

A chave reversora possibilita inverter a polaridade do enrolamento série em relação ao enrolamento comum. Na Figura 16 os índices R e E significam que quando a chave reversora estiver conectada no ponto R o regulador opera como redutor de tensão e quando estiver conectada no ponto E como elevador de tensão.

A bobina de *tap*'s dos reguladores de tensão (enrolamento série) é composta por diversas derivações de maneira a possibilitar que se tenham degraus de tensão, ou os chamados *tap*'s. Nos reguladores de tensão de 32 Degraus, o enrolamento série do regulador de tensão possui um número de espiras igual a 11,25% do número de espiras do enrolamento comum e 8 derivações dispostas de modo a dividi-lo em 9 partes iguais. Neste caso, a tensão que se desenvolve entre os terminais extremos do enrolamento série é 11,25% da tensão aplicada no enrolamento comum e a tensão entre as derivações adjacentes corresponde a 1/9 de 11,25%, isto é, 1,25% da tensão do enrolamento comum.

A operação do comutador de derivações deve permitir uma variação gradual na tensão de saída, ou seja, uma comutação de um *tap* para outro, sem que haja interrupção na corrente de carga. A passagem simples de corrente de uma derivação para outra provocaria descontinuidade no circuito e consequentemente interrupção no circuito com todas suas consequências indesejáveis (arco, desgaste de contatos, oscilações de tensão). Para evitar esta interrupção de corrente e possibilitar a comutação sob carga, utiliza-se um reator de comutação ao circuito, conforme mostrado na Figura 17 (FELÍCIO, 2006). O reator de comutação é composto por uma bobina com uma derivação central ligada à fonte e duas derivações nas extremidades seguidas por dois contatos móveis, no lugar de um só, que operam como uma única unidade. A sequência de operação dos contatos móveis do reator de comutação é mostrada na Figura 18 (SZUVOVIVSKI, 2008) indicando a passagem entre duas derivações do enrolamento série (chave reversora na posição E). A inserção do reator no circuito do regulador de tensão também tem o intuito de evitar que ocorra curto circuito entre as espiras do regulador e reduzir o valor da corrente circulante na situação em que os contatos móveis apareçam conectados em derivações adjacentes.

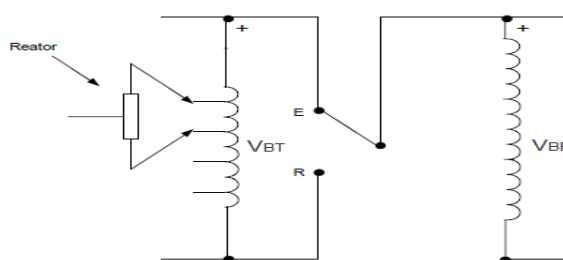


Figura 17 – Reator de comutação do circuito do regulador de tensão (FELÍCIO, 2006)

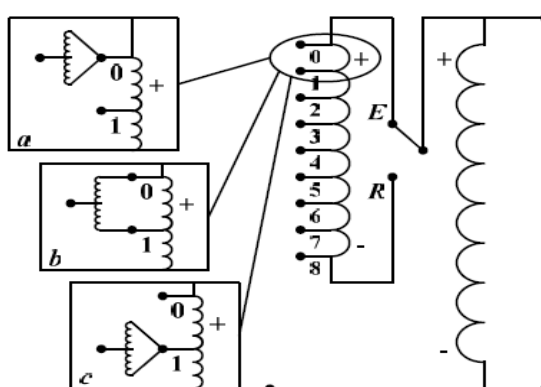


Figura 18 – Operação do reator de comutação (SZUVOVIVSKI, 2008)

Conforme se verifica na Figura 18, na posição mostrada no detalhe *a*, os dois contatos móveis estão na posição 0, que corresponde ao neutro do enrolamento série do regulador de tensão, na configuração de elevação de tensão. Nesse caso, quando uma tensão de 100 % é aplicada na entrada do RT, a tensão de saída também é de 100 %. Na condição mostrada no detalhe *b*, um dos contatos móveis continua posicionado na derivação 0 e o outro contato móvel é deslocado para a derivação 1, existindo uma diferença de potencial de 1,25% entre estes contatos. Quando uma tensão de 100 % é aplicada na entrada do RT e quando os contatos móveis estão posicionados de acordo com o detalhe *b* da Figura 18, a tensão de saída é igual à tensão de entrada aumentada da metade da diferença de potencial entre os contatos 0 e 1 (5/8 %), ou seja, 100,625 %. Quando os contatos móveis estão posicionados conforme o detalhe *c* da Figura 18, deixa de existir uma diferença de potencial entre os contatos, no entanto, há uma inserção de 1/8 da bobina de *tap's* no circuito do RT, que equivale a um *tap*. Nesta configuração a tensão de saída é aumentada em 1,25 % em relação à tensão de entrada, ou seja, para uma tensão nominal de 100 % na entrada, tem-se 101,250 % desta tensão na saída do regulador de tensão.

Desta maneira, os contatos móveis podem estar em 8 condições em uma mesma derivação ou um mesmo *tap* e em outras 8 condições em que estarão em *tap's* diferentes, totalizando 16 degraus de tensão para o caso em que a chave reversora estiver na posição de elevação de tensão, além da posição de neutro. Quando a chave reversora estiver posicionada para a redução de tensão tem-se mais 16 degraus de tensão, neste caso o *tap* 8 da Figura 18 passa a ser o *tap* neutro, o *tap* 7 passa a ser a derivação 1 e assim por diante. Cada um dos 32 degraus de tensão totalizados possui passo de 0,625 %, fornecendo assim uma faixa de regulação na saída do regulador de ± 10 % da tensão de entrada, além da posição de neutro.

O regulador de tensão de 32 Degraus é dividido de acordo com a norma ANSI C57.15 (ANSI/IEEE STD. C57.15, 1986) em dois tipos, denominados A e B. O Tipo A é chamado de regulador com excitação variável porque a bobina de excitação sente qualquer variação que ocorra na tensão da fonte. Neste tipo o enrolamento comum está conectado à fonte (circuito primário) e o enrolamento série está conectado ao enrolamento comum e, através das derivações à carga do circuito (enrolamento secundário). O regulador Tipo B é chamado de regulador de excitação constante, pois as variações da fonte não são sentidas (ABNT NBR 11809, 1992). Neste tipo de regulador, o circuito primário (fonte) está conectado, através das derivações, ao enrolamento série e o enrolamento comum está conectado diretamente à carga (circuito secundário). Estes dois tipos de reguladores de tensão podem elevar ou abaixar a tensão, dependendo da polaridade das bobinas eletricamente conectadas.

Na Figura 19 pode-se visualizar o circuito mecânico completo do regulador de tensão 32 Degraus do tipo A.

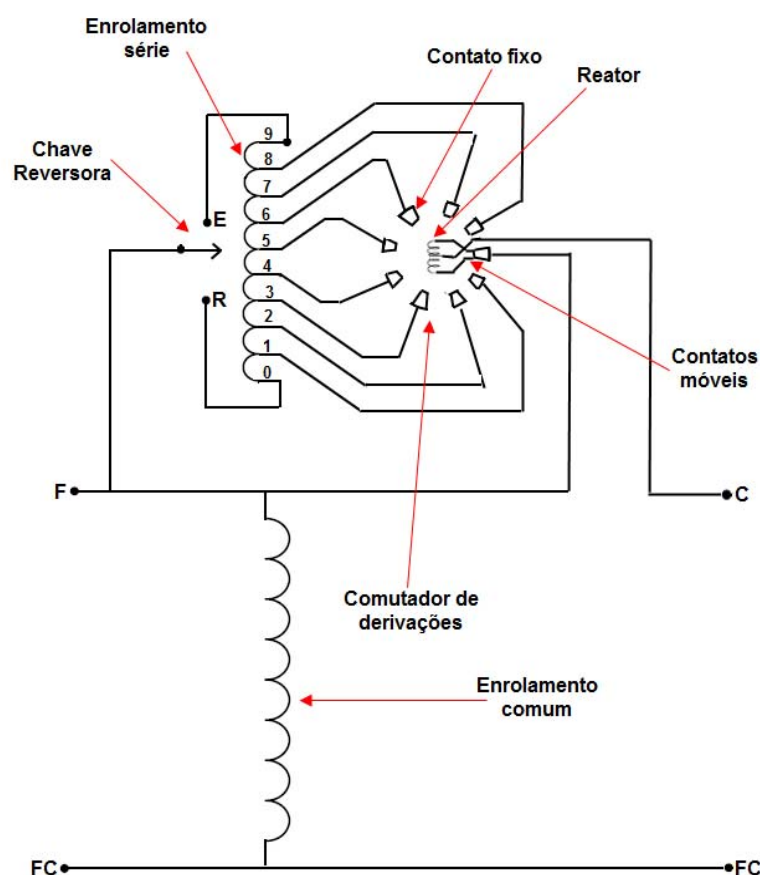


Figura 19 – Circuito mecânico do regulador de tensão 32 Degraus Tipo A

3.1.2 Circuito de Controle

O regulador de tensão possui, além do circuito mecânico já descrito, um circuito de controle que é responsável pela comutação dos *tap's* sempre que a tensão na saída do regulador viola os limites pré-determinados. Na Figura 20 (SZUVOVIVSKI, 2008), está apresentado um diagrama de blocos com os principais elementos do circuito de controle de um regulador de tensão. Dentre estes elementos estão compreendidos: Transformador de Potencial - TP, Compensador de Queda de Linha ou *Line-Drop Compensator* – LDC, Sensor de Tensão e Temporizador.

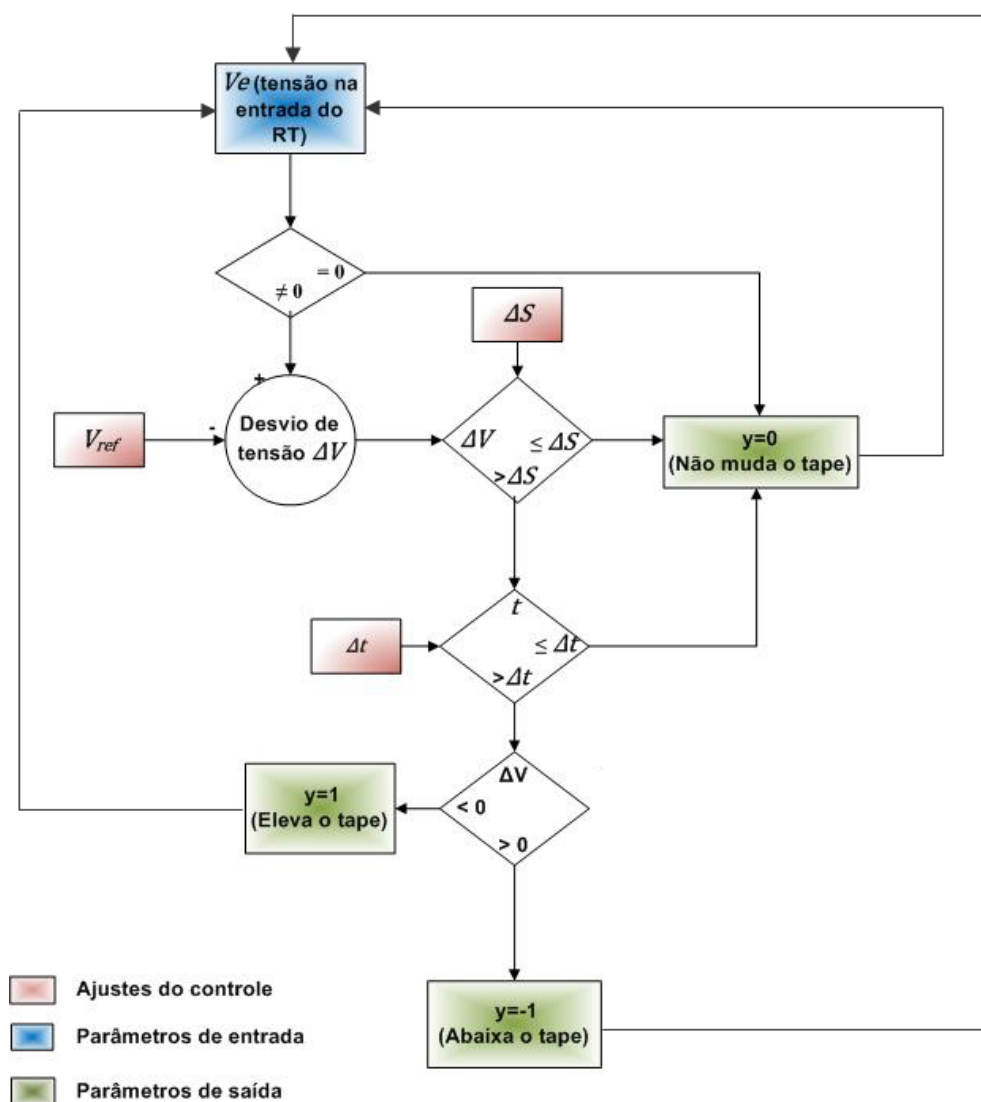


Figura 21 – Fluxograma da lógica básica para ajuste dos *tap's* em reguladores de tensão

Os ajustes normalmente disponibilizados em um regulador de tensão por degraus são descritos na seção a seguir (TOSHIBA, 2000).

3.1.2.1 Tensão de Referência

A Tensão de Referência (V_{ref}) a ser ajustada no circuito de controle do RT corresponde ao nível de tensão que se pretende manter nos consumidores ao longo da linha. Este ajuste pode ser baseado na necessidade do sistema ou em determinações legais.

O TP instalado no lado da carga do regulador de tensão fornece uma amostra da tensão no ponto do circuito no qual o RT está instalado proporcional àquela de operação do sistema. Esta amostra de tensão é comparada pelo sensor de tensão do relé do regulador com a tensão de referência ajustada no regulador de tensão. Quando a tensão de entrada desvia da tensão de referência ajustada, além de uma determinada tolerância e por certo tempo, envia-se um comando para o mecanismo que faz a mudança de *tap's* para que este atue de maneira a trazer de volta a tensão para os limites estabelecidos.

3.1.2.2 Largura de Banda

A Largura de Banda ou *Bandwidth* (ΔS) determina uma faixa de precisão, a partir da tensão de referência, na qual o regulador de tensão considera que não há a necessidade de comutação entre *tap's*.

Esta faixa deve ser ajustada de modo a impedir que pequenas alterações na amplitude da tensão de entrada resultem em comutações de *tap's* desnecessárias. Quanto menor o ajuste da Largura de Banda, melhor será o nível de tensão, entretanto, mais comutações serão provocadas, pois desta maneira pequenas variações já são suficientes para iniciar o processo de comutação.

3.1.2.3 Temporização

A temporização (Δt) ajustada no sensor de tempo do RT diz respeito a um intervalo tempo dentro do qual não é realizada a comutação de *tap's*, mesmo que a variação da tensão de entrada em relação à tensão de referência seja maior que a largura de banda ajustada. O objetivo deste ajuste é evitar comutações desnecessárias em função de variações muito rápidas de tensão ou transitórios. Quanto menor o tempo de atraso ajustado, melhor será o nível de tensão entregue aos consumidores, porém, há um aumento no número de comutações e consequentemente maior desgaste dos reguladores de tensão.

Com os ajustes indicados, a mudança de *tap's* ocorre somente para variações de tensão que estejam fora dos valores ajustados pela tensão de referência mais a largura de faixa, e por período maior que o determinado na temporização, conforme pode-se verificar na Figura 22.

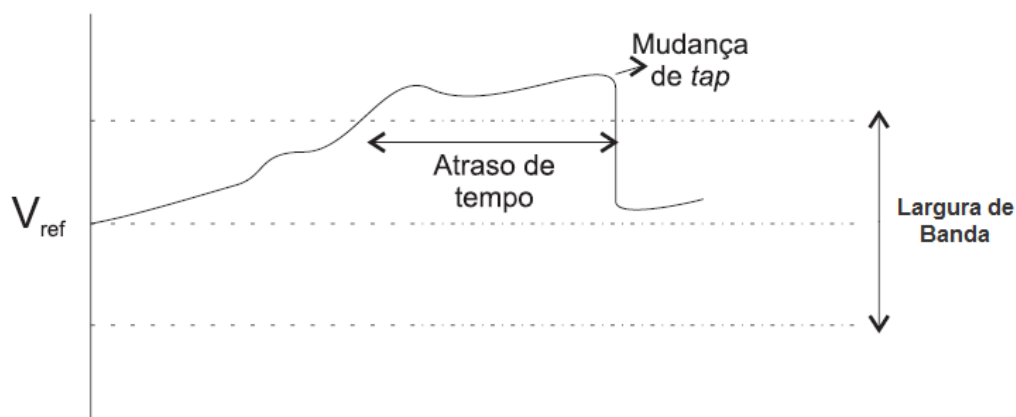


Figura 22 – Ajustes do controle convencional para mudança de tap do RT

Quando reguladores de tensão operam em série, o ajuste de temporização destes equipamentos é bastante importante para a coordenação de sua operação. Quanto mais distante da fonte estiver o regulador, maior deve ser o seu ajuste de atraso de tempo. Tal regra pode ser justificada pelo fato de mudanças de *tap* nos reguladores mais distantes não serem vistas pelos reguladores a montante. Já as comutações no regulador mais próximo da fonte afetam todos os reguladores à jusante deste.

3.1.2.4 Compensador de Queda de Linha

A Compensação de Queda na Linha é um recurso disponibilizado em alguns reguladores de tensão que possibilita obter tensão mais próxima da ajustado, ao longo da linha, minimizando as oscilações de tensão que a linha experimenta devido às variações na corrente de carga (SZUVOVIVSKI, 2008).

O princípio de funcionamento do compensador de queda de linha é feito pelo ajuste dos valores da resistência e reatância da linha que são determinados com base na impedância, “vista” pelo regulador, entre o ponto onde está o regulador e o ponto onde se deseja controlar a tensão. O objetivo deste recurso é fornecer a tensão mais próxima possível daquela ajustada como tensão de referência ao longo do alimentador no qual o regulador de tensão está instalado. O circuito de controle do compensador de queda de linha simula as quedas de tensão existentes na linha, fazendo com que o regulador as compense.

O aumento da tensão no RT, causado pela Compensação de Queda na Linha, é uma função dos ajustes de resistência e reatância do controle eletrônico e da corrente da linha, conforme mostrado na Figura 23 (O conhecimento da corrente da linha e da impedância da linha pode ser manipulado dentro da magnitude da queda de tensão da linha).

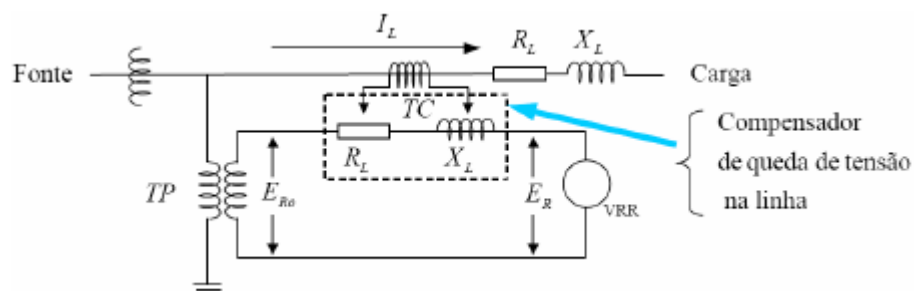


Figura 23 – Circuito do Compensador de Queda de Linha (SZUVOVIVSKI, 2008)

3.1.2.5 Inversão do Fluxo de Potência

Considerando-se que atualmente os sistemas de distribuição não possuem apenas uma fonte de tensão, sabe-se que o fluxo de potência ora pode estar em um sentido outrora no sentido inverso. Caso os reguladores de tensão operem com fluxo de potência no sentido inverso, estes equipamentos têm comportamento comprometido, podendo causar sobretensões ou subtensões no circuito ligado ao terminal fonte do regulador.

Visando evitar tais efeitos, alguns reguladores de tensão são dotados de um detector de fluxo inverso de potência, podendo atuar bidireccionalmente, ou seja, podendo regular em qualquer direção de fluxo de potência. Dessa maneira, um regulador bidirecional mede a tensão no lado da fonte utilizando outro TP, caso o fluxo de potência inverso seja detectado, esse passa automaticamente a regular pelo lado da carga.

Quando é detectado fluxo inverso de potência, para que o regulador opere adequadamente, são feitas alterações no funcionamento destes equipamentos:

- O sentido de rotação do motor do comutador de derivações é invertido;
- O TP deve ser removido para o novo lado da carga;

- Inversão da polaridade do Compensador de Queda de Linha e, se necessário, novos ajustes nos valores de compensação.

3.2 NOVAS TENDÊNCIAS PARA REGULADORES DE TENSÃO

Os princípios de funcionamento e de fabricação de reguladores de tensão descritos vêm sendo utilizado sem muitas mudanças há algum tempo. O primeiro comutador de *tap's* foi desenvolvido no começo deste século e os comutadores não sofreram muitas alterações radicais desde então, sendo ainda constituídos, essencialmente, por dispositivos mecânicos (RODRIGUES, 2007). Mesmo assim os reguladores de tensão têm desempenhado papel de grande importância na operação dos sistemas elétricos.

Entretanto, com o avanço da eletrônica de potência nos últimos anos, que tem produzido uma nova geração de equipamentos para o setor elétrico de alta capacidade, disseminando sua aplicação, esforços têm sido direcionados no desenvolvimento de reguladores de tensão baseados nesta tecnologia e não mais na utilização de circuitos mecânicos para comutação de *tap's* sob carga.

Têm-se dedicado muitos esforços para desenvolver comutadores eletrônicos utilizando as modernas chaves semicondutoras e assim tornar possível a substituição do comutador mecânico de *tap's*. A comutação eletrônica de *tap's* consiste em uma das novas áreas de aplicação da eletrônica de potência, com o emprego de células de comutação com chaves bidirecionais (BAUER, 2003). Além da comutação eletrônica de *tap's* reduzir significativamente o tempo de comutação, permite a comutação não sequencial entre *tap's*.

Os resultados obtidos com a aplicação de um regulador de tensão com múltiplos ajustes são apresentados em (CARRARO *et al*, 2006). Este equipamento permite que sejam realizados ajustes diferentes para determinados períodos do dia e/ou para diferentes dias da semana. Com a adequada parametrização deste equipamento foi obtida uma redução no número de comutações para o mesmo ponto de instalação, garantindo níveis de tensão mais adequados para o alimentador estudado. É importante lembrar que, do mesmo modo que um regulador convencional, o regulador com múltiplos ajustes também apresenta os recursos de temporização inversa e compensação de queda de tensão na linha.

Um comutador eletrônico de *tap's* para os reguladores de tensão é proposto em (AREDES e ENCARNAÇÃO, 2009). A substituição da parte ativa do regulador, atualmente eletromecânica, por tiristores garante um tempo de resposta muito menor do que os reguladores convencionais. Desta forma as variações de tensão são rapidamente corrigidas possibilitando inclusive a compensação de variações de tensão de curta duração. Os resultados obtidos em (AREDES e ENCARNAÇÃO, 2009) foram baseados em simulações e prevê o desenvolvimento de um protótipo para aplicação em redes reais.

A continuidade do desenvolvimento de novos reguladores de tensão, com o objetivo de proporcionar novos ajustes e resposta mais rápida, tem o intuito de garantir um controle de tensão mais adequado e é de grande importância para o setor elétrico. Vislumbra-se também que a utilização de reguladores de tensão dotados de potencial de programação terá grande aplicação em futuro próximo, principalmente considerando a inserção da filosofia de redes inteligentes (*smart grid*) no sistema.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo abordou-se sobre reguladores de tensão com o intuito de identificar o funcionamento tanto do circuito mecânico quanto do circuito de controle destes equipamentos empregados em redes de distribuição a fim de regular os níveis de tensão entregues aos consumidores. Além disso, foram pesquisadas novas tendências para a fabricação destes equipamentos.

Em relação a esta dissertação é importante ressaltar a lógica de controle utilizada para a comutação de *tap's* dos reguladores de tensão, principalmente no que diz respeito às situações em que a tensão na entrada do regulador é nula e nenhum comando para elevar ou abaixar seu *tape* é acionado, fazendo com que o *tap* permaneça fixo na posição que se encontrava antes da interrupção até o momento do restabelecimento de energia. Conforme já exposto, este ajuste fixo de *tap's* pode não ser adequado em determinadas situações e é justamente nestas situações que se pretende utilizar o Fluxo de Potência Ótimo para identificar a posição ótima dos *tapes* dos reguladores de tensão para o momento do restabelecimento de energia.

4 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

O Fluxo de Potência Ótimo consiste em resolver um conjunto de equações algébricas que resultam da aplicação das leis de Kirchhoff a uma rede elétrica em regime permanente senoidal cujas potências demandadas são conhecidas.

Diferentemente de um problema clássico de Fluxo de Potência, que necessita da especificação de algumas variáveis, tais como, magnitudes de tensão e potência ativa gerada nas barras de geração, o FPO as trata como variáveis de otimização (ou seja, passíveis de ajustes). Assim, ele geralmente é apresentado como um problema de otimização, onde se procura maximizar ou minimizar um índice de desempenho, atendendo simultaneamente a um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade.

As restrições de igualdade englobam o balanço de potência ativa e reativa das barras e as restrições operacionais representam os limites físicos e operacionais da rede. Além dos ajustes tradicionais de um FPO pode-se utilizar também a otimização dos *tap's* dos reguladores de tensão que atuam no processo do controle de tensão da rede.

A formulação inicial do FPO é apresentada em (CARPENTIER, 1962) e, desde então, diversos métodos foram propostos para a sua resolução. Dentre eles destacam-se:

- a) Método do Gradiente Reduzido (DOMMEL e TINNEY, 1968);
- b) Método de Newton (SUN *et al*, 1984);
- c) Método de Programação Linear Sucessiva (ALSAÇ *et al*, 1990);
- d) Método Primal-Dual de Pontos Interiores – MPDPI (QUINTANA *et al*, 2000; GRANVILLE, 1994).

O Método Primal-Dual de Pontos Interiores tem se mostrado muito robusto quando aplicado a sistemas de grande porte e mal condicionados, referentes tanto a redes de transmissão quanto de distribuição.

4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O FPO é geralmente formulado como um problema de Programação Não-Linear, de acordo com o seguinte formato padrão:

Minimizar $f(\mathbf{z})$

sujeito a

$$g(\mathbf{z}) = 0$$

$$h(\mathbf{z}) \leq 0$$

Onde:

\mathbf{z} é o vetor de variáveis do problema;

$f(\mathbf{z})$ é a função objetivo;

$g(\mathbf{z})$ é o vetor de restrições de igualdade;

$h(\mathbf{z})$ é o vetor de restrições de desigualdade.

4.1.1 Variáveis

As variáveis a serem otimizadas no FPO são divididas em variáveis dependentes ou de estado e variáveis independentes ou de controle.

Entende-se por variáveis de estado o conjunto mínimo de variáveis capaz de caracterizar unicamente o estado de operação da rede elétrica. Na formulação do fluxo de potência ótimo, normalmente, a cada barra da rede são associadas duas variáveis de estado:

- θ_i – ângulo de tensão na barra i ,
- V_i – módulo de tensão na barra i .

As variáveis independentes, ou de controle, são aquelas que, durante o processo de solução, são alteradas com o intuito de se obter o ponto ótimo de operação. Na prática, estas variáveis podem ser:

- Potência ativa gerada em cada máquina;
- Módulo da tensão nas barras de geração;
- Potência reativa gerada;
- Posição de *tap* de transformador;
- Posição de *tap* de regulador de tensão;
- Susceptância shunt de bancos de capacitores e reatores;

- Potência transmitida entre links DC;
- Fluxo de intercâmbio entre áreas;
- Reatância de capacitor série.

4.1.2 Função Objetivo

Várias funções objetivo são utilizadas no problema de FPO. Algumas destas funções são:

- Minimização das perdas ativas – visa diminuir o valor total das perdas no sistema;
- Mínimo custo de geração de potência ativa – visa representar o despacho econômico da rede. O custo de geração de potência ativa é normalmente representado como uma função linear em relação à potência ativa gerada em cada máquina.
- Mínimo desvio de potência ativa – objetiva encontrar solução, tal que, todas as restrições sejam atendidas, porém sem se distanciar do despacho de geração pré-especificado.
- Mínimo corte de carga – é utilizada quando se deseja encontrar solução para o problema em situações de emergência aliviando a carga do sistema, se necessário, para restabelecer limites operativos como o carregamento de linhas e tensões nas barras.
- Mínimo custo de alocação de fontes de reativos – essa função é utilizada no planejamento de instalações de novas fontes de potência reativa.
- Máximo carregamento – é utilizada no contexto de colapso de tensão ou em estudos econômicos na determinação da máxima capacidade de atendimento de carga de um sistema de potência com o objetivo de maximizar a carga, mantendo o mesmo fator de potência, de um conjunto de barra da rede a ser pré-especificado.
- Manutenção de um perfil plano de tensão nas barras do sistema - esta função objetivo procura fazer com que as magnitudes de tensão em todas as barras fiquem o mais próximo possível da tensão nominal (1 pu).

4.1.3 Restrições de Igualdade

No FPO, o conjunto de restrições de igualdade representa o fechamento do balanço de carga e geração da rede elétrica. Assim, as restrições de igualdade correspondem às equações de balanço de potência ativa e reativa (3) e (4), respectivamente:

$$P_g - P_d = \text{real}[\text{diag}(\dot{V}) \cdot (\dot{Y} \cdot \dot{V})^*] \quad (3)$$

$$Q_g - Q_d = \text{imag}[\text{diag}(\dot{V}) \cdot (\dot{Y} \cdot \dot{V})^*] \quad (4)$$

onde:

- P_g – vetor de geração de potência ativa ($nb \times 1$);
- P_d – vetor de demanda de potência ativa ($nb \times 1$);
- Q_d – vetor demanda de potência reativa ($nb \times 1$);
- Q_g – vetor de geração de potência reativa ($nb \times 1$);
- \dot{Y} – matriz de admitância de barra ($nb \times nb$);
- \dot{V} – vetor de tensão fasorial ($nb \times 1$);
- nb – número de barras.

4.1.4 Restrições de Desigualdade

As restrições de desigualdade representam os limites das variáveis do sistema, ou seja, as restrições funcionais dos equipamentos e operacionais do sistema, enumeradas seguir.

a) Limites de geração de potência ativa:

$$P_g^{min} \leq P_g \leq P_g^{max} \quad (5)$$

onde

P_g^{min} – vetor com limites geração mínima de potência ativa ($nb \times 1$);

P_g^{max} – vetor com limites geração máxima de potência ativa ($nb \times 1$).

b) Limites de geração de potência reativa:

$$Q_g^{min} \leq Q_g \leq Q_g^{max} \quad (6)$$

onde

Q_g^{min} – vetor com limites geração mínima de potência reativa ($nb \times 1$);

Q_g^{max} – vetor com limites geração máxima de potência reativa ($nb \times 1$).

c) Limites de magnitude de tensão:

$$V_i^{min} \leq |\dot{V}_i| \leq V_i^{max} \quad (7)$$

onde

V_i^{min} – vetor com limites mínimos de magnitude de tensão ($nb \times 1$);

V_i^{max} – vetor com limites máximos de magnitude de tensão ($nb \times 1$).

d) Limites de tp 's dos reguladores de tensão:

$$tp_{min} \leq tp \leq tp_{max} \quad (8)$$

onde

tp_{min} – limite mínimo de tp 's de reguladores de tensão ($nl \times 1$);

tp_{max} – limite máximo de tp 's de reguladores de tensão ($nl \times 1$);

nl – número de linhas.

Os reguladores são modelados como autotransformadores com relação de transformação igual a $1:tp$, sendo que tp representa a relação das magnitudes de tensão, afetando os elementos da matriz admitância de barra do regulador, \dot{Y}_R , do seguinte modo:

$$\dot{Y}_{im} = -tp_{im}^* \cdot \dot{y}_{im} \quad (9)$$

$$\dot{Y}_{mi} = tp_{mi} \cdot \dot{y}_{mi} \quad (10)$$

$$\dot{Y}_{ii} = \sum_{m \in \Omega_i} (|tp_{im}|^2 \cdot \dot{y}_{im}) \quad (11)$$

$$\dot{Y}_{mm} = \sum_{i \in \Omega_m} (\dot{y}_{im}) \quad (12)$$

onde

\dot{Y}_{im} – linha i e coluna m da matriz \dot{Y} que representa a conexão entre as barras i e m ;

\dot{Y}_{mi} – linha m e coluna i da matriz \dot{Y} que representa a conexão entre as barras m e i ;

\dot{Y}_{ii} – linha i e coluna i da matriz \dot{Y} que representa o valor das admitâncias conectadas na barra i ;

\dot{Y}_{mm} – linha m e coluna m da matriz \dot{Y} que representa o valor das admitâncias conectadas na barra m ;

tp_{im} – relação de transformação do regulador entre as barras i e m ;

\dot{y}_{im} – admitância do elemento que conecta as barras i e m ;

Ω_i – é o conjunto das barras vizinhas da barra i ;

Ω_m – é o conjunto das barras vizinhas da barra m .

4.2 MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES

Para solução do problema de otimização representado pelas equações (3)-(8), e mais a função objetivo escolhida, utiliza-se o Método dos Pontos Interiores versão Primal-Dual – MPDPI (GRANVILLE, 1994), já consagrado na literatura para solução de um FPO.

Esse problema quando resolvido pelo Método dos Pontos Interiores Versão Primal-Dual obtém a solução ótima mantendo a direção de busca dentro da região delimitada pelas restrições. Para tanto, transforma as inequações do problema em equações de igualdades através da introdução de variáveis de folga e considera a não-negatividade das mesmas através da adição de uma função barreira logarítmica na função objetivo.

O MPDPI pertence a uma classe de algoritmos de otimização originalmente designados para problemas de programação linear. Entretanto, devido ao seu alto grau de desempenho, tal método foi estendido para problemas de programação quadrática, convexa e problemas gerais de otimização diferenciáveis.

No método de pontos interiores, o problema de otimização é transformado em um problema contendo apenas restrições de igualdade através da introdução de variáveis de folga estritamente positivas. Estas variáveis de folga são incorporadas à função objetivo através de barreiras logarítmicas.

Ao incorporar a barreira logarítmica, o MPDPI busca resolver o problema de otimização para cada valor do parâmetro barreira, fazendo com que o parâmetro barreira tenda a zero. Assim, para cada valor do parâmetro barreira executa-se uma iteração do Método de Newton-Raphson no sistema de equações não-lineares definidos pelas condições de otimalidade de primeira ordem.

Uma vez obtido os pontos estacionários da função Lagrangeana estabelece-se critérios para atualização do parâmetro barreira, para inicialização das variáveis e teste de convergência completando assim uma iteração do FPO via MPDPI.

A base teórica e formulação matemática da versão do Método de Pontos Interiores versão Primal-Dual estão apresentadas em detalhes no Apêndice A.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a formulação clássica do Fluxo de Potência Ótimo, com as possibilidades de parâmetros a serem otimizados, ou seja, as diferentes funções que podem ser definidas como funções objetivo, as restrições de igualdade e desigualdade do problema e o método utilizado para solução do problema (MPDPI).

O FPO é a ferramenta de síntese utilizada para realizar a seleção ótima de tapes dos reguladores de tensão, quando a tensão na entrada destes equipamentos for nula (interrupção de energia), neste trabalho.

5 MÉTODO DESENVOLVIDO

Tendo como base os principais conceitos sobre: a) qualidade de energia e distúrbios mais comumente encontrados na rede de distribuição, dentre eles conceitos sobre regulação de tensão em regime permanente (variações de tensão de longa duração) impostos pela Resolução N° 461/2010 da ANEEL; b) o princípio de funcionamento dos reguladores de tensão, abordando seus circuitos mecânico e de controle; e, c) a teoria de Fluxo de Potência Ótimo; torna-se possível o desenvolvimento da metodologia adotada para elaboração do método proposto neste trabalho.

5.1 METODOLOGIA

O método proposto neste trabalho consiste em adicionar, em paralelo ao circuito de controle convencional do regulador de tensão, um controle supervisor no qual seja implementada a seleção ótima de *tap's* dos reguladores de tensão quando ocorrer uma interrupção de energia no sistema.

Na lógica do controle convencional dos reguladores de tensão, quando a tensão em sua entrada é nula, nenhum comando para mudança de *tap's* é executado. Isto é, o *tap* do regulador de tensão continua na posição em que se encontrava antes da falta de energia, conforme pode ser verificado no fluxograma apresentado na Figura 21 do item 3.1.2 desta dissertação.

Portanto, para o desenvolvimento do método proposto deve-se primeiramente assumir a presença de um monitoramento do perfil de tensão na entrada dos reguladores de tensão, com o intuito de atuar nos momentos em que são identificadas interrupções de energia no sistema, ou seja, tensão igual à zero na entrada do regulador de tensão.

A partir deste monitoramento de tensão, nas situações em que o perfil desta tensão é diferente de zero significa que o sistema elétrico está operando de forma normal e o controle convencional de ajuste dos *tap's* é mantido nos reguladores de tensão. Quando o perfil de tensão é igual a zero, isto indica uma falta em algum ponto do sistema, um comando do controle supervisor proposto é acionado, fazendo com que o ajuste dos *tap's* seja realizado pelo método a seguir descrito e não pelo método convencional.

No caso de tensão nula na entrada do regulador de tensão, soluciona-se o FPO, com os parâmetros da rede, mas considerando-se que apenas cargas baixas, isto é, cargas que não seriam desconectadas do alimentador por suas proteções locais, estão conectadas. Quando o FPO é solucionado, tem-se o perfil ótimo de tensão de modo que as magnitudes de tensão em todas as barras fiquem o mais próximo possível da tensão nominal (1 pu) e, conseqüentemente, têm-se as posições dos *tap's* dos reguladores de tensão (ver item 4.2). Neste momento o controle supervisorio proposto envia aos reguladores de tensão um comando para que os *tap's* sejam direcionados da posição em que se encontravam antes da interrupção de energia para a posição ótima determinada pela solução do FPO. Esta é a posição em que os mesmos devem estar ajustados no momento do restabelecimento do sistema. Assim que a medição do perfil de tensão na entrada do regulador de tensão deixa de ser nula, os *tap's* dos reguladores de tensão estarão na posição ótima para a situação na qual o sistema elétrico se encontra e o controle convencional volta a ser utilizado. Na medida em que as cargas pesadas são reconectadas no alimentador, os *tap's* vão sendo ajustados visando manter o nível de tensão dentro dos limites estabelecidos pelas resoluções normativas.

Cabe ressaltar que caso ocorra o restabelecimento de energia e a posição ótima identificada ainda não tenha sido ajustada no regulador de tensão em função do tempo necessário para as comutações entre tapes, ou seja, o tape ajustado esteja entre aquele da posição pré-interrupção e o da posição ótima identificada, as elevações de tensão de curta duração já estarão sendo minimizadas.

Na Figura 24, pode-se verificar o fluxograma do método proposto como possível solução para o problema de elevações de tensão e subtensões momentâneas geradas nos sistemas de distribuição em função do ajuste inadequado dos *tap's* dos reguladores de tensão quando ocorrem interrupções de energia nesses sistemas.

Um ponto importante no método proposto é a necessidade de definir valores máximos para as potências ativa e reativa das barras que indiquem “cargas pesadas” que não estarão conectadas após o restabelecimento de energia. Ou seja, quando as barras localizadas a jusante do ponto da falta de energia possuem valores de potência superiores ao especificado pelo usuário, estes valores são desconsiderados e admite-se potência nula nestas barras. Este ajuste tem o intuito de caracterizar as barras que possuem cargas pesadas conectadas com proteções locais que as desconectam da rede em situações de interrupções de energia. Sendo assim, no método desenvolvido o FPO é solucionado para a condição do novo perfil de cargas que o alimentador de distribuição irá possuir no momento do restabelecimento de energia.

O parâmetro de saída do método desenvolvido é sempre o comando y para elevar, abaixar ou manter a posição do *tap* do RT, independentemente do ajuste ter sido realizado pelo controle convencional ou pelo controle supervisor. Quando o ajuste dos *tap*'s é realizado pelo controle otimizado, para chegar aos parâmetros de saída de interesse do método, a solução do FPO fornece o *tap* ótimo (tp_o) identificado para o regulador de tensão para o novo perfil de cargas conectadas ao alimentador no momento da reenergização do sistema. Este *tap* ótimo será comparado com o *tap* em que o regulador está (tp_i) de maneira a enviar comandos (y) que irão elevar ou abaixar a posição do *tap* do regulador de tensão até que a posição do *tap* ótimo identificado seja alcançada. Ou seja, o *tap* será alterado da posição prévia à interrupção de energia até a posição ótima identificada para o momento do restabelecimento de energia.

5.2 SOLUÇÃO DO FPO

No método desenvolvido a função objetivo do fluxo de potência ótimo busca a manutenção de um perfil plano de tensão nas barras do sistema, de maneira a manter as tensões em todas as barras do sistema o mais próximo possível de 1 pu ou de uma tensão de referência desejada. Esta função objetivo é descrita na equação (13):

$$f(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^{nb} (V_i - 1)^2 \quad (13)$$

onde

nb : número de barras;

V_i : módulo de tensão na barra i .

As restrições de igualdade e de desigualdade do problema correspondem àquelas convencionais da formulação do fluxo de potência ótimo, conforme exposto nos itens 4.1.3 e 4.1.4 desta dissertação.

Dentre os métodos existentes para resolução do FPO o Método Primal-Dual de Pontos Interiores foi adotado em função de ser um método robusto e apropriado para sistemas de grande porte e algumas vezes mal dimensionados (item 4.2 e Apêndice A).

A variável tp que representa a relação das magnitudes de tensão das barras que possuem reguladores de tensão, introduzida no FPO através das restrições de desigualdade do problema, é a variável de resposta de interesse do FPO para o ajuste otimizado dos tap 's dos reguladores de tensão. Esta variável é contínua e estará dentro da faixa estipulada entre tp_{min} e tp_{max} . Para esta variável representar efetivamente a posição dos tap 's dos reguladores de tensão essa variável necessita ser “convertida” para uma variável discreta.

Para realizar a conversão da variável tp contínua em uma variável discreta que represente efetivamente a posição do tap do regulador de tensão, ao valor de relação da magnitude de tensão mínimo (tp_{min}) é acrescido o valor do degrau de tensão do regulador e a cada degrau é definida uma faixa de magnitude de relação de tensão que corresponderá a um determinado tap , tendo-se assim os tap 's positivos, abaixadores de tensão. Para a definição dos tap 's negativos, elevadores de tensão diminuem-se do valor de relação da magnitude de tensão máximo (tp_{max}) os valores de degrau de tensão do regulador. Quando tp é igual a 1 pu (relação de magnitude de tensão) o tap corresponde ao tap neutro do regulador de tensão. Esta variável discreta que representa efetivamente a posição ótima do tap dos reguladores de tensão é definida como tp_o .

5.3 REGULADORES DE TENSÃO CONECTADOS EM SÉRIE

Para o adequado funcionamento do controle supervisorio proposto o caso de alimentadores que contam com reguladores de tensão conectados em série deve ser tratado com a relevância requerida. Nestes casos, em função do sistema elétrico ser dinâmico, e, o ajuste de *tap's* dos reguladores de tensão consequentemente também, há a necessidade dos RTs conectados em série a outros terem conhecimento do ajuste de *tap's* daqueles conectados a seu montante no alimentador.

Esta necessidade fica explícita na seguinte situação, por exemplo, no caso de um alimentador com dois RTs conectados em série e uma falta entre eles (conforme Figura 25), a tensão na entrada do RT1 não será nula e na entrada do RT2 será. Neste exemplo, segundo a lógica do método proposto (Figura 24), o ajuste dos *tap's* do primeiro RT será realizado pelo controle convencional do equipamento e do segundo RT pelo controle supervisorio proposto. Como o controle supervisorio proposto é baseado na solução do FPO do sistema, é necessário que a posição do *tap* do RT1 seja fornecida como parâmetro de entrada para a adequada identificação do ajuste ótimo para o *tap* do RT2 no momento do restabelecimento de energia, já que a posição do *tap* do RT1 que continua conectado pode ser alterada uma ou mais vezes durante a interrupção de energia.

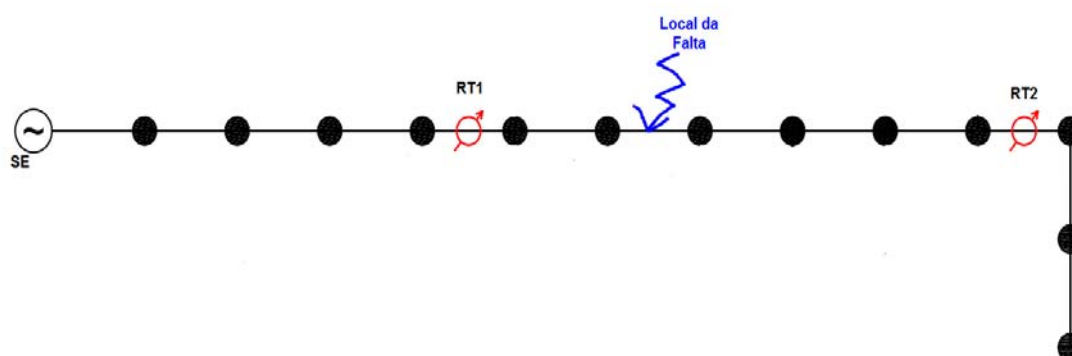


Figura 25 – Alimentador de distribuição com RTs conectados em série

No caso da operação normal do sistema, como ambos os RTS estão conectados ao alimentador, quando uma mudança de *tap's* ocorre em um RT a montante de outro esta mudança é percebida pelo RT a jusante e o ajuste de *tap's* deste já considera a posição dos *tap's* dos RTs a seu montante. Como o problema tema desta dissertação envolve casos de ocorrência de interrupções de energia, quando há uma falta entre dois reguladores de tensão o primeiro continua conectado ao alimentador e seu *tap* é ajustado de maneira a se adequar ao novo perfil de cargas do alimentador, entretanto, o segundo regulador, que está desconectado do alimentador não percebe os ajustes que estão sendo feitos naquele que ainda está conectado.

Sendo assim, no fluxograma da Figura 24, está descrito que a posição dos *tap's* dos RTS que estão conectados a montante daquele RT para o qual está sendo realizado o ajuste ótimo de *tap's* necessita ser informada para o adequado funcionamento do controle supervisorio proposto.

Esta iteração entre os reguladores de tensão conectados em série em um alimentador justifica a necessidade da aplicação do método de modo “on-line”, sendo alimentado com os parâmetros que continuam se alterando dinamicamente mesmo com a interrupção de energia a partir de um determinado local do alimentador.

6 RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os testes e validações do método proposto para a seleção ótima de *tap's* de reguladores de tensão e consequente mitigação das variações de tensão de curta duração, em situações de interrupção de energia, em alimentadores de distribuição.

Para tanto são utilizados dois sistemas de distribuição baseados no sistema IEEE 123-barras (KERSTING, 2001), o qual é apropriado para estudos relacionados a problemas de ajustes de tensão, para os estudos de caso. O primeiro sistema representa um alimentador de distribuição trifásico equilibrado com 36 barras, tensão nominal 4,16 kV e dois reguladores de tensão conectados em série ao longo do alimentador. O segundo sistema também representa um alimentador de distribuição trifásico equilibrado e com tensão nominal 4,16 kV, entretanto, conta com 55 barras e três reguladores de tensão conectados em série.

Os sistemas de distribuição foram reproduzidos em ambiente de simulação na interface Simulink do software Matlab® com as cargas modeladas com impedância constante. Para a solução do FPO é realizada uma rotina através de uma função do Matlab® e para este na formulação do FPO as cargas são modeladas com potência constante. Além disso, embora o sistema modelado no Simulink seja trifásico, a formulação do FPO utilizada foi monofásica.

Visando avaliar o problema tema desta dissertação através de estudos de casos foram avaliadas interrupções de energia (faltas) para três diferentes localizações nos dois alimentadores de distribuição abordados e com posterior restabelecimento do sistema.

A seguir são mostrados os resultados das simulações com e sem o método desenvolvido para ajuste dos *tap's* dos reguladores de tensão. Para cada localização de falta, uma simulação considerando apenas o controle convencional do regulador para ajuste dos *tap's* e outra considerando o método proposto nesta dissertação são comparadas. Cabe ressaltar que, no caso do controle convencional do regulador de tensão, quando ocorrem interrupções de energia, o *tap* deste equipamento permanece na posição previamente ajustada para o sistema.

6.2 MODELO DOS REGULADORES DE TENSÃO

O modelo dos reguladores de tensão utilizados nas simulações correspondem ao bloco *Three-Phase OLTC (On Load Tap Control) Regulating Transformer* da biblioteca *Power Systems* do Simulink do Matlab®.

Este modelo corresponde a um transformador regulador trifásico do Tipo B com relação de transformação 1:1 e que possui comutação sob carga de *tap's*. O regulador possui 8 *tap's* elevadores, 8 *tap's* abaixadores e 1 *tap* neutro, correspondendo a 17 degraus de tensão. Cada degrau de tensão é equivalente a 0,01875 pu.

Os ajustes realizados no controle do regulador para a Largura de Banda e para a Temporização foram, respectivamente, 0,0375 pu e 5 s. Cabe ressaltar que o modelo utilizado não possui os recursos de Compensação de Queda de Linha e Inversão do Fluxo de Potência apresentados nos itens 3.1.2.4 e 3.1.2.5.

6.3 SISTEMA DE 36 BARRAS

A Figura 26 mostra o sistema de 36 barras simulado onde a barra 35 é a barra da SE e os reguladores de tensão estão alocados entre as barras 9 e 14 (linha 11) e entre as barras 25 e 26 (linha 27). Os dados de linhas, impedâncias e comprimentos, e de barras, potências ativas e reativas demandadas, do sistema simulado estão apresentados na Tabela 1 do Anexo B.

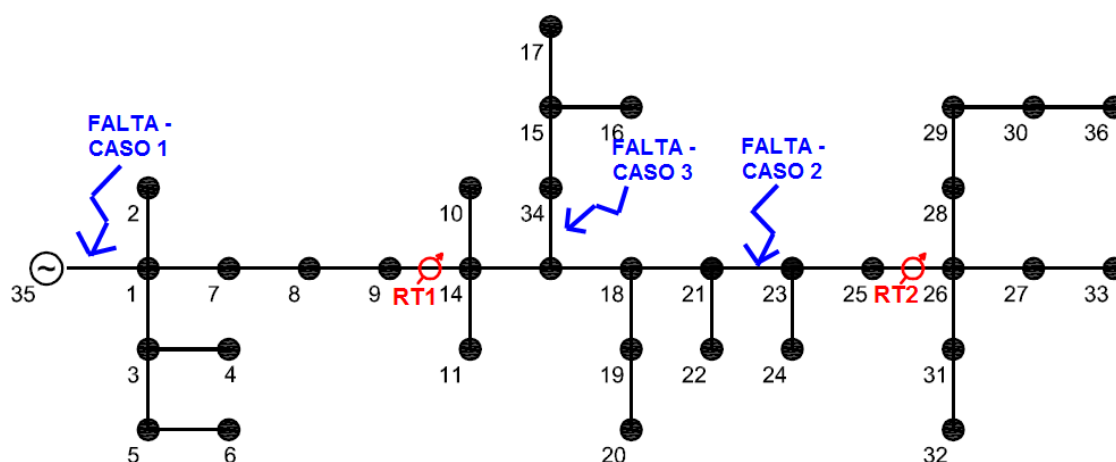


Figura 26 – Sistema de 36 barras

A tensão base do sistema é 4,16 kV e as potências ativa e reativa base são respectivamente 3×10^5 W e $1,25 \times 10^5$ Var. As cargas acima de 80 KW – 40 kvar, para estes estudos de caso, foram definidas como cargas que possuem proteções locais que as desconectam da rede quando há uma interrupção de energia a montante da sua localização no alimentador.

Na Figura 26 estão apresentadas também as localizações das faltas no alimentador 36 barras que serão abordadas para avaliação do método proposto nesta dissertação.

As tensões monitoradas nos estudos de caso realizados foram as tensões de saída da subestação (B35), e de saída dos RTs (B9 e B25). Além disso, monitorou-se a potência ativa e reativa conectadas aos RTs (B9 e B25).

6.3.1 Caso 1 – Falta na Saída da Subestação

O estudo de caso realizado corresponde à simulação de uma interrupção de energia na saída da subestação, barra 35 da Figura 26. Conforme pode-se verificar na Figura 27 e na Figura 28, ao se observar o perfil de tensão na barra B35 (SE) nota-se que com um tempo de 20 s ocorre a interrupção de energia e com 80 s ocorre o restabelecimento do sistema.

Neste caso, todas as cargas conectadas ao alimentador que possuem potências ativas e reativas superiores a 80 kW – 40 kvar, cargas das barras 7, 10, 11, 20, 24, 29, 30 e 31 (Tabela 1 do Anexo B), são desconectadas da rede por suas proteções locais quando ocorre a interrupção de energia. A partir do momento que acontece o restabelecimento do sistema estas cargas são reconectadas ao alimentador de maneira gradativa entre 7 – 17 s após o restabelecimento (87 a 97 s da simulação). Pode-se notar tanto na Figura 27 como na Figura 28 que o perfil de potências ativa e reativa conectadas aos dois reguladores de tensão, no momento da interrupção de energia (20 s) passa a ser nulo e posteriormente ao restabelecimento (80 s) volta aos poucos ao mesmo nível do perfil de cargas que estavam conectadas na situação pré-interrupção de energia.

Cabe ressaltar que, a situação pré-interrupção de energia (0 – 20 s) corresponde à situação em que o sistema operava em sua condição normal, com os *tap's* dos reguladores ajustados de maneira a evitar a transgressão dos limites de tensão estipulados pela legislação.

Os resultados obtidos nas simulações com o controle convencional e com o método proposto estão apresentados, respectivamente, na Figura 27 e na Figura 28.

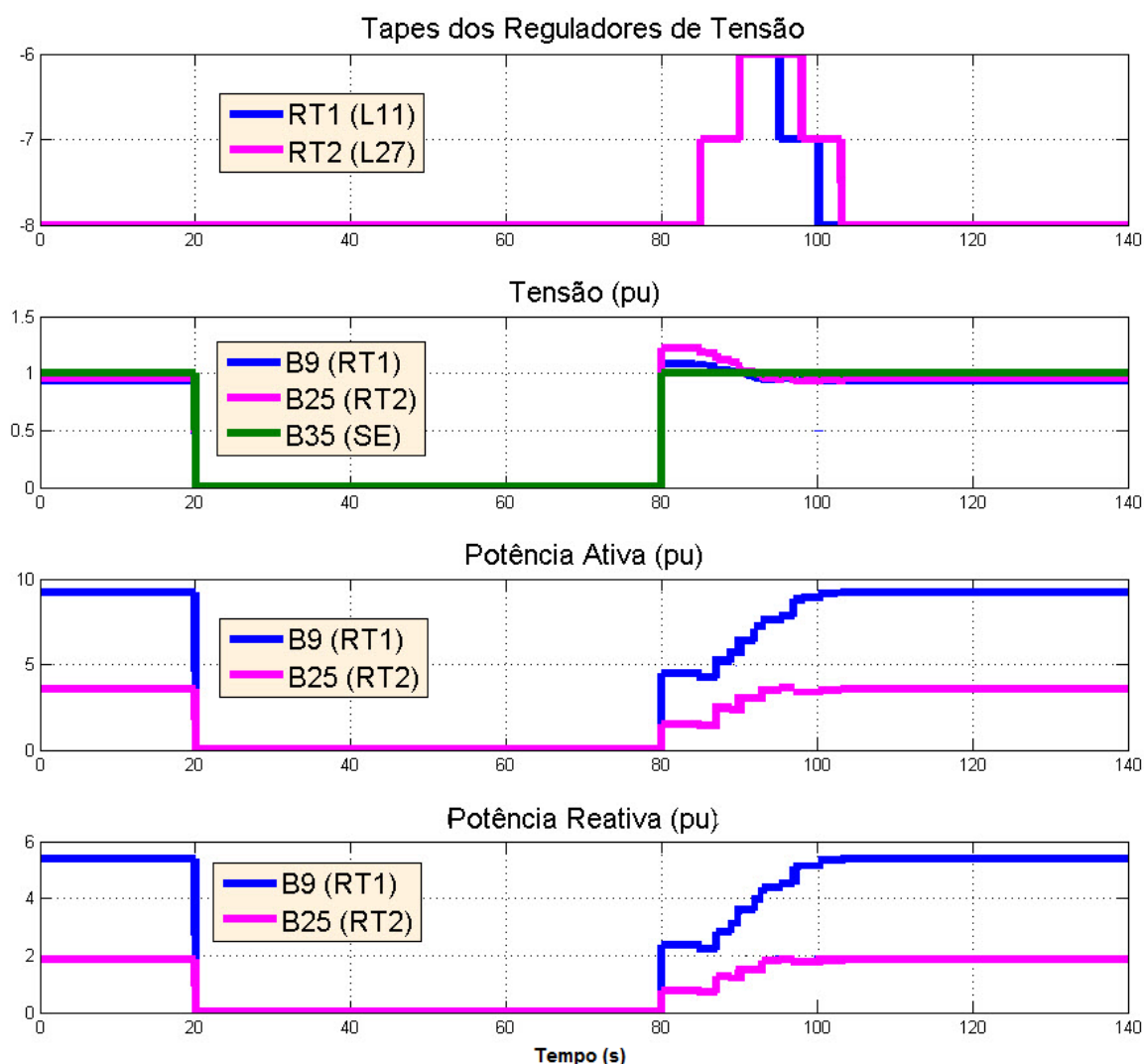


Figura 27 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional

Observando a Figura 27, verifica-se que, quando apenas o controle convencional está ativo no regulador de tensão, o problema tratado nesta dissertação fica evidenciado. Ou seja, no momento do restabelecimento de energia (80 s), em função dos *tap's* dos reguladores de tensão estarem previamente ajustados para uma situação na qual o carregamento era mais pesado, elevações de tensão de curta duração são ocasionadas.

Pode-se verificar neste caso que, na situação de pré-interrupção de energia (operação em regime permanente, antes de 20 s), os *tap's* dos dois reguladores de tensão conectados à rede se encontravam na posição -8 (elevação de tensão) para

compensar a queda de tensão existente ao longo do alimentador. Durante a interrupção de energia (20 - 80 s) os *tap*'s que estavam ajustados para a situação de operação normal da rede continuam fixos nas mesmas posições. Em função deste ajuste inadequado para o momento do restabelecimento de energia (80 s), as tensões nas barras B9 (RT1) e B25 (RT2) são iguais a 1,0856 pu e 1,238 pu, respectivamente. Ou seja, elevações de tensão de 8,5% e 23,8% ocorrem, respectivamente, à jusante dos reguladores de tensão conectados às barras B9 e B25. No caso da tensão a jusante da barra B25, esta elevação de tensão é caracterizada como variação de tensão de curta duração, pois possui magnitude superior a 1,1 pu e ocorre até que haja tempo suficiente para o controle convencional dos reguladores de tensão realizar a comutação para a nova posição adequada (5 s para cada mudança de posição).

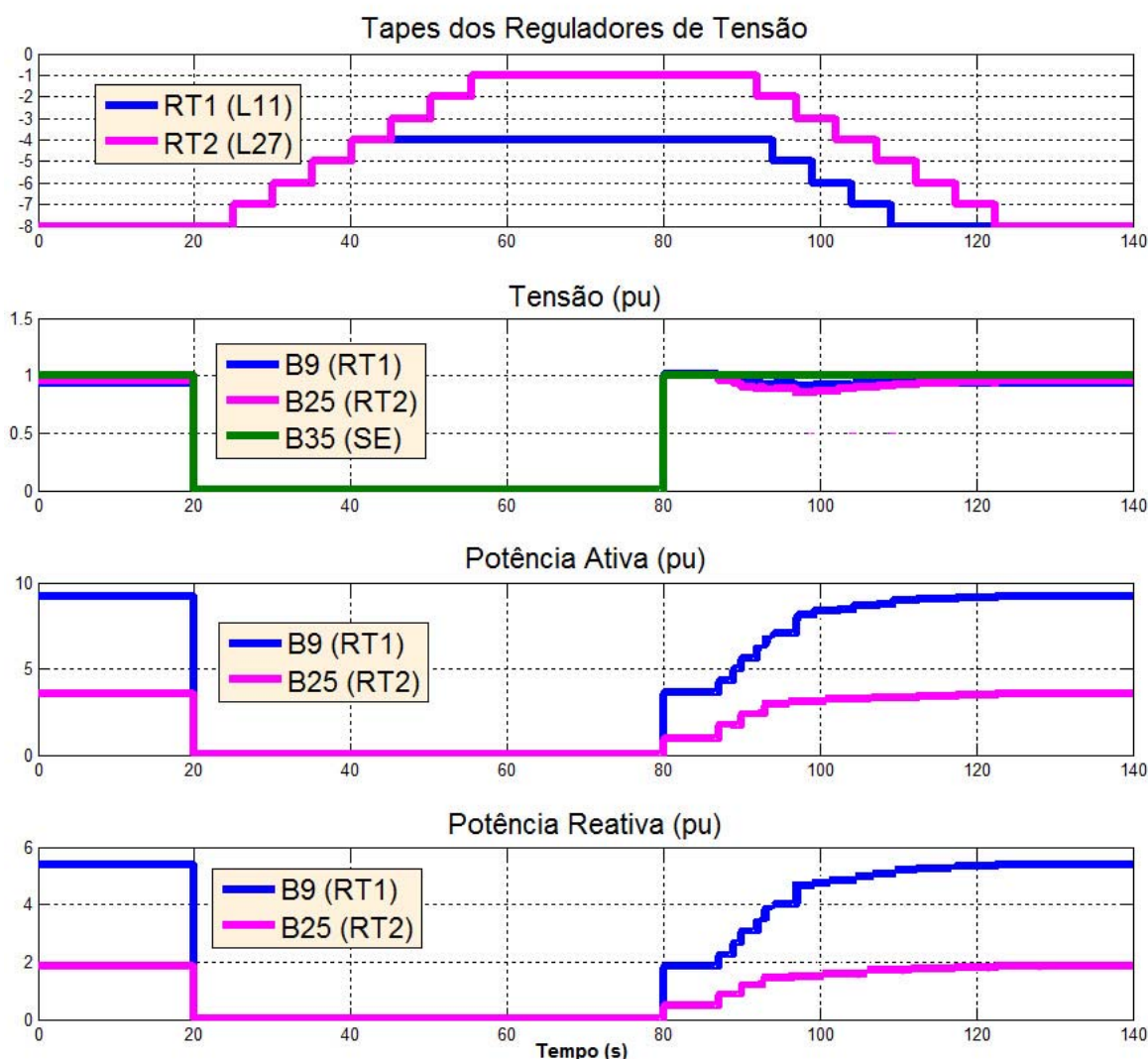


Figura 28 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto

Na simulação na qual foi utilizado o método proposto para efetuar a seleção ótima de *tap's* do regulador (Figura 28), quando ocorre a interrupção de energia, entre 20 e 80 s, há uma mudança no perfil de cargas conectadas ao alimentador. Entretanto, no momento do restabelecimento de energia (80 s) os *tap's* dos reguladores de tensão já são adequados ao novo perfil de cargas conectadas ao alimentador. Neste caso a partir de 20 s o controle supervisorio proposto é acionado identificando, segundo a solução do FPO, as posições ótimas -4 e -1, respectivamente, para os reguladores 1 e 2. Estas posições ótimas são identificadas pelo FPO em menos de 1 s e então é realizada a mudança dos tapes dos reguladores que estavam na posição -8 (ideal para o momento anterior à interrupção) para essas posições ótimas identificadas para o novo perfil de cargas do momento do restabelecimento. Cabe ressaltar que para cada mudança de posições de tapes sequenciais os RTs utilizados nas simulações têm tempo de 5 s.

Desta maneira, quando ocorre o restabelecimento do sistema, evita-se que elevações de tensão ocorram e sejam transmitidas às cargas que permaneceram conectadas ao alimentador. Pode-se notar na Figura 28 que as tensões nas barras B9 (RT1) e B25 (RT2) no momento do restabelecimento de energia são aproximadamente iguais à 1 pu.

Assim que ocorre o restabelecimento de energia, a partir de 80 s, a seleção dos *tap's* volta a ser realizada através do controle convencional do regulador e os *tap's* vão se adequando conforme as cargas pesadas são reinseridas no sistema. Nota-se, na Figura 28, que conforme as cargas pesadas são reinseridas no sistema, após o restabelecimento de energia, em função do tempo de transição entre tapes não ser imediato e o ajuste ótimo ter sido realizado para um perfil mais leve de cargas há a presença de afundamentos de tensão. Entretanto, é importante ressaltar que a tensão de referência utilizada para o ajuste ótimo dos tapes durante a interrupção de energia foi 1 pu, mas o método permite que esta tensão tenha outro ajuste. Portanto, se, por exemplo, a tensão de referência fosse ajustada em 1,1 pu estes afundamentos de tensão seriam minimizados. Outro ponto a ser destacado em relação à presença destes afundamentos de tensão diz respeito à sua grande dependência do tempo de reconexão das cargas pesadas, que poderia assumir em situações reais diferentes valores daqueles definidos para esta simulação.

6.3.2 Caso 2 – Falta ao Longo do Alimentador

Neste estudo de caso simulou-se uma interrupção de energia entre as barras 21 e 23 do alimentador de 36 barras da Figura 26. Esta falta localiza-se entre os dois reguladores de tensão conectados em série no alimentador. Na Figura 29 e na Figura 30 pode-se verificar que a tensão na barra B25 (RT2) é nula (interrupção de energia) entre os instantes de tempo de 20 a 80 s, enquanto que as tensões nas barras B35 (SE) e B9 (RT1) permanecem diferentes de zero.

Como a falta ocorreu em um local ao longo do alimentador, as cargas que estão conectadas a montante do ponto da falta continuam conectadas, mesmo que possuam proteções locais, pois para estas cargas a tensão em nenhum momento será nula, o que caracterizaria uma interrupção de energia. Portanto, enquanto o fornecimento de energia está interrompido (entre 20 e 80 s) todas as cargas a jusante do ponto da falta não estão conectadas ao alimentador e quando ocorre o restabelecimento do sistema (após 80 s) apenas aquelas cargas conectadas a jusante do local da falta e que possuem proteções próprias não estarão conectadas. Estas cargas correspondem àquelas das barras 24, 29, 30 e 31 da Tabela 1 do Anexo B e quando ocorre o restabelecimento do sistema as mesmas são reconectadas ao alimentador de maneira gradativa entre 87 – 97 s.

Pode-se notar tanto na Figura 29 como na Figura 30 que o perfil de potências ativa e reativa conectadas ao RT2 é nulo durante a interrupção de energia (20 – 80 s), enquanto que, no RT1 o perfil de cargas apenas é reduzido proporcionalmente às cargas que estão conectadas após o local da falta. Após o restabelecimento (80 s) todas aquelas cargas conectadas a montante do local da falta mais àquelas que não possuem proteções locais e estão localizadas a jusante da falta estão conectadas ao alimentador, e, posteriormente, as demais cargas (pesadas) são reinseridas no sistema de maneira gradativa.

A situação pré-interrupção de energia (0 – 20 s) corresponde à situação em que o sistema operava em sua condição normal, com os *tap's* dos reguladores ajustados de maneira a evitar a transgressão dos limites de tensão estipulados pela legislação.

Os resultados obtidos nas simulações com o controle convencional e com o método proposto estão apresentados, respectivamente, na Figura 29 e na Figura 30.

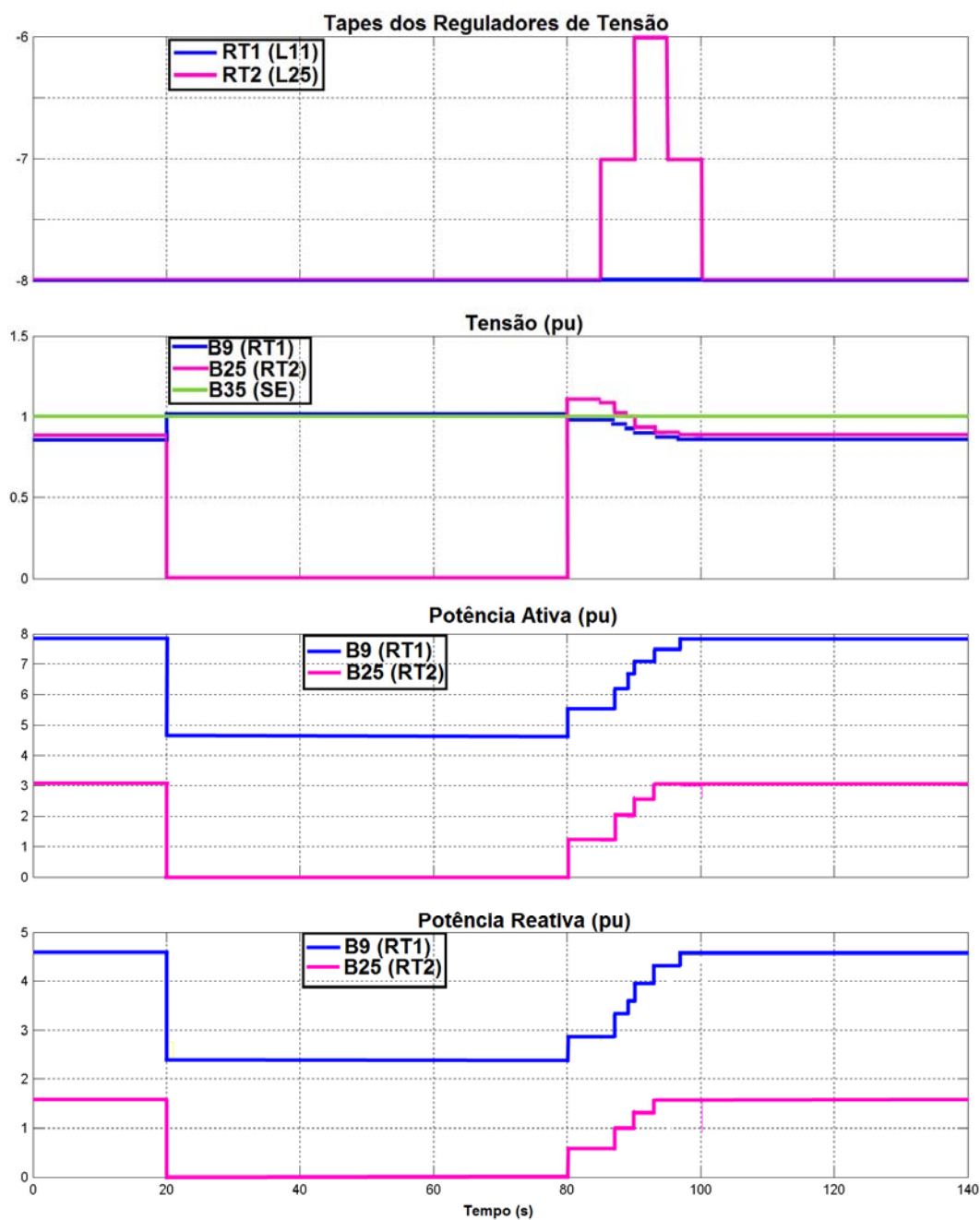


Figura 29 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional

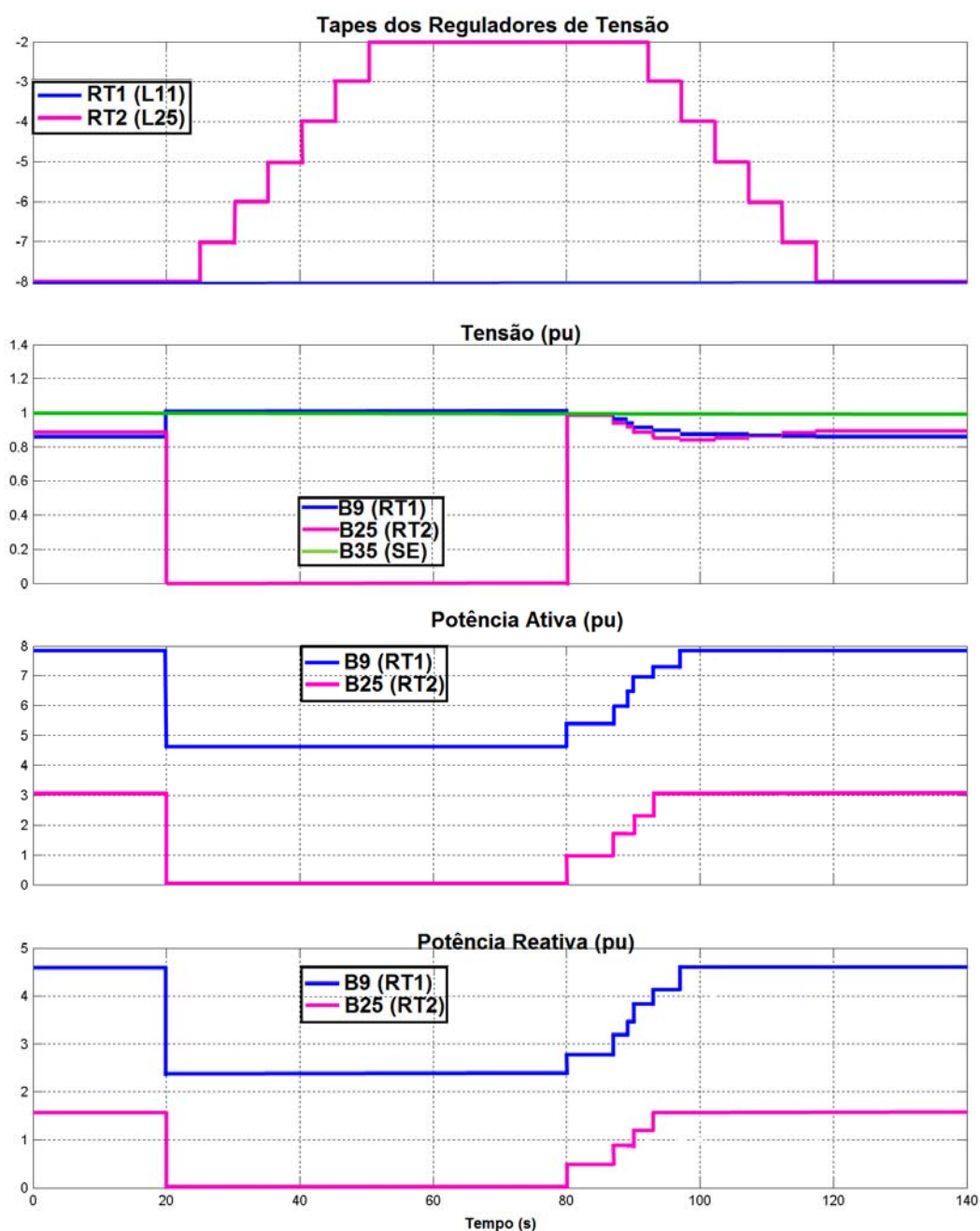


Figura 30 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto

Nota-se na Figura 29 que na situação pré-interrupção de energia (0 a 20 s), quando o sistema operava em sua condição normal, os *tap*'s dos dois reguladores de tensão estavam ajustados na posição -8, visando compensar a queda de tensão ao longo do alimentador. Quando ocorre a interrupção de energia os *tap*'s permanecem fixos nesta mesma posição, pois no RT1 a mudança do nível de tensão (B9) em função de um novo perfil de cargas (nenhuma carga que estava conectada a jusante do ponto da falta está mais conectada) não é suficiente para que ocorra a

comutação de *tap's* neste regulador e, no RT2 a tensão na sua entrada (B25) é nula, situação na qual, segundo o controle convencional dos reguladores de tensão, não ocorre comutação de *tap's*. No momento do restabelecimento de energia (80 s), aquelas cargas definidas nesta dissertação como leves (abaixo de 80 kW – 40 kvar) e que estão localizadas a jusante do ponto da falta já estão reconectadas no sistema, entretanto, as cargas pesadas ainda não. Como os *tap's* não foram alterados para este novo perfil de cargas, elevações de tensão de curta duração de mais de 11% são ocasionadas a jusante do RT2 (tensão na barra B25 é igual a 1,15 pu).

Quando a comutação dos *tap's* do RT2 (aquele em que a tensão na entrada é nula) é realizada através do controle supervisorio proposto nesta dissertação (Figura 30), no momento em que ocorre a interrupção de energia (20 – 80 s) e há a mudança no perfil de cargas conectadas ao alimentador, o *tap* RT2 muda da posição -8 para a posição ótima identificada -3. Desta maneira a tensão na barra B25 no momento do restabelecimento é 0,995 pu (muito próxima de 1 pu) e assim são evitadas as elevações de tensão que seriam transmitidas às cargas que ainda permaneceram conectadas ao alimentador caso o controle supervisorio não fosse utilizado. A partir de 80 s o controle convencional para ajuste dos tapes dos reguladores de tensão volta a atuar de maneira a realizar os ajustes impedindo que elevações ou afundamentos de tensão ocorram em função da reconexão das cargas gradativamente.

6.3.3 Caso 3 – Falta em um Ramal do Alimentador sem RT

O estudo de caso 3 corresponde à simulação de uma interrupção de energia em um ramal do alimentador que não conta com RT instalado. Neste caso a falta foi entre as barras 13 e 34 do sistema de 36 barras da Figura 26. Esta interrupção de energia também está localizada em um ponto do alimentador entre os dois RTs, conforme o Caso 2, entretanto, as tensões de entrada dos dois RTs não são nulas durante a interrupção (20 a 80 s) conforme pode-se verificar na Figura 31.

Mesmo que a magnitude de tensão na entrada dos RTs não seja nula, quando ocorre a interrupção de energia e as cargas que estavam conectadas a jusante do ponto da falta são desconectadas do alimentador, o perfil de cargas conectado ao RT1 é alterado. Em função da diminuição da queda de tensão ao

longo do alimentador (linhas e cargas desconectadas) há uma elevação de tensão de 4% na barra B25 – RT2 (20 s). Entretanto, como o RT continua conectado ao sistema, seu controle convencional já realiza a comutação de *tap's* necessária para adequar o nível de tensão na barra B25. O mesmo acontece quando a energia é restabelecida (80 s), e consequentemente as cargas são reinseridas no sistema, ocasionado um afundamento de tensão de 3% na barra B25. Nesta situação os *tap's* também são ajustados pelo controle convencional do regulador de tensão de modo a adequar o nível de tensão nesta barra.

Deste modo, neste caso, mesmo utilizando o método desenvolvido, o ajuste dos *tap's* dos reguladores de tensão será efetuado pelo controle convencional destes equipamentos, já que suas tensões de entrada não são nulas. Este fato demonstra que, caso a interrupção de energia não afete a tensão de entrada do regulador de tensão, o controle supervisor proposto não será acionado, e mesmo que nestas situações sejam gerados afundamentos ou elevações de tensão no alimentador, o método proposto não irá atuar de maneira a evitá-las, pois o objetivo principal do método é realizar a troca de posição dos *tap's* dos reguladores enquanto estes estiverem desconectados do sistema, o que não acontece convencionalmente. No caso descrito, como a tensão de entrada nos RTS não é nula, e a mudança do perfil de cargas é imediata, o tempo que seria utilizado (durante a interrupção de energia) para alterar os *tap's* não pode ser aproveitado.

Fica evidente também que em situações nas quais não sejam observadas as características do problema tema desta dissertação o método proposto não irá causar ajustes equivocados para os *tap's* dos reguladores de tensão conectados em alimentadores de distribuição.

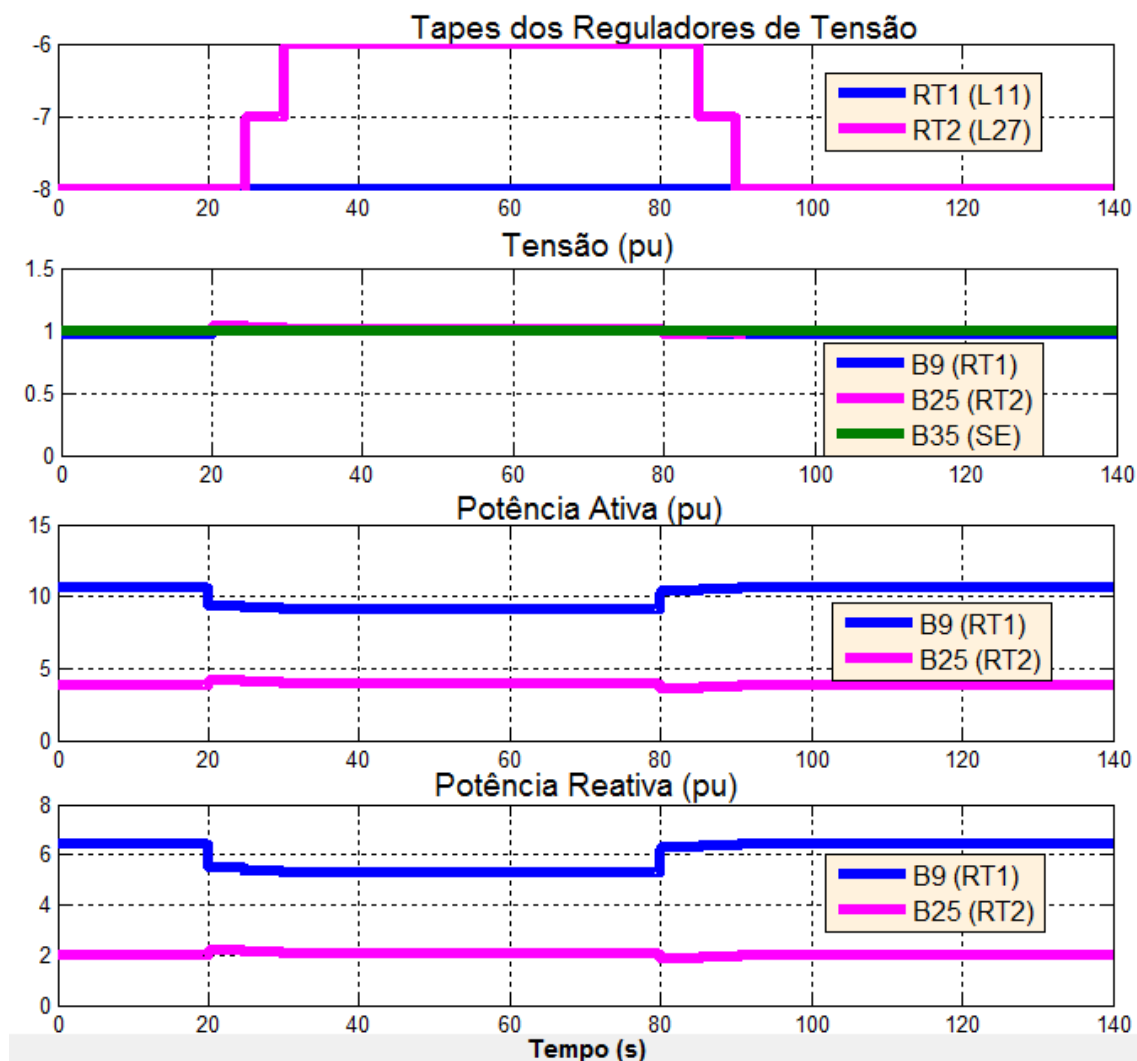


Figura 31 – Caso 3: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional ou pelo Método Proposto

6.4 SISTEMA DE 55 BARRAS

A Figura 32 contém o sistema de 55 barras simulado, onde a barra 35 é a barra da SE e os reguladores de tensão estão alocados entre as barras 9 e 14 (linha 11), entre as barras 25 e 26 (linha 27) e entre as barras 40 e 55 (linha 40). Os dados de linha, impedâncias e comprimentos, e de barra, potências ativas e reativas demandadas, do sistema estão apresentados na Tabela 2 do Anexo B. Na Figura 32 estão apresentadas também as localizações das faltas no alimentador 55 barras que serão abordadas para avaliação do método proposto nesta dissertação.

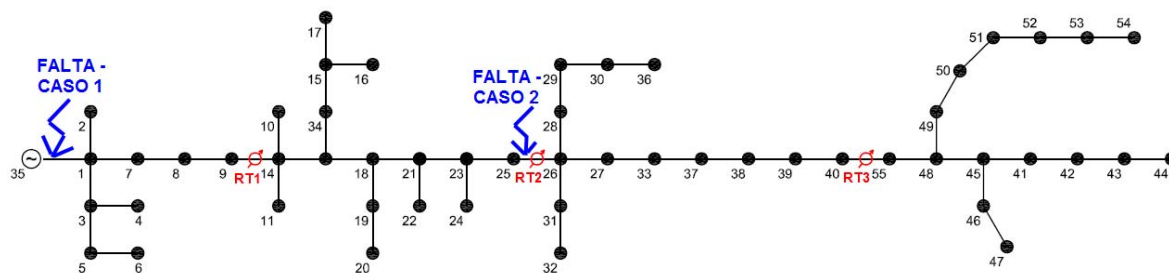


Figura 32 – Sistema de 55 barras

A tensão base do sistema é 4,16 kV e as potências ativa e reativa bases são respectivamente 3×10^5 W e $1,25 \times 10^5$ Var. As cargas acima de 80 KW – 40 kvar foram definidas como cargas que possuem proteções locais que as desconectam da rede quando há uma interrupção de energia a montante da sua localização no alimentador nestes estudos de caso.

As tensões monitoradas foram as tensões de saída da subestação (B35) e de saída dos RTs (B9, B25 e B40). Além disso, monitorou-se a potência ativa e reativa conectada aos RTs (B9, B25 e B40).

6.4.1 Caso 1 – Falta na Saída da Subestação

Este estudo de caso é similar ao apresentado no item 6.3.1 com a simulação de uma interrupção de energia na saída da subestação barra 35, entretanto, neste caso o alimentador possui 55 barras e três reguladores de tensão conectados em série. A interrupção de energia ocorre entre os instantes de 20 e 80 s da simulação, conforme se pode observar no perfil de tensão da barra B35 (SE) na Figura 33 e na Figura 34.

As cargas conectadas ao alimentador que possuem potências ativas e reativas superiores a 80 kW – 40 kvar são aquelas conectadas às barras 7, 10, 11, 20, 24, 29, 30, 31, 37, 39, 42, 44, 47, 51, 52, e 53 (Tabela 2 do Anexo B). Estas cargas correspondem àquelas que são desconectadas da rede por suas proteções locais quando ocorre a interrupção de energia (20 – 80 s). A partir do momento do restabelecimento de energia (80 s), estas as cargas são reconectadas ao alimentador de maneira gradativa entre 7 – 38 s após o restabelecimento (87 e 118 s da simulação). Pode-se notar, tanto na Figura 33 como na Figura 34, que o perfil de

potências ativa e reativa conectadas aos três reguladores de tensão, no momento da interrupção de energia (20 s) passa a ser nulo e no momento do restabelecimento (80 s) se encontra em um patamar inferior àquele da situação pré-interrupção e vai aumentando aos poucos até atingir o nível do perfil de cargas que estavam conectadas na situação pré-interrupção de energia.

A situação pré-interrupção de energia (0 – 20 s) corresponde à situação em que o sistema operava em sua condição normal, com os *tap*'s dos reguladores ajustados de maneira a evitar a transgressão dos limites de tensão estipulados pela legislação.

Os resultados obtidos nas simulações para o caso do controle convencional, e para o método proposto estão apresentados, respectivamente, na Figura 33 e na Figura 34.

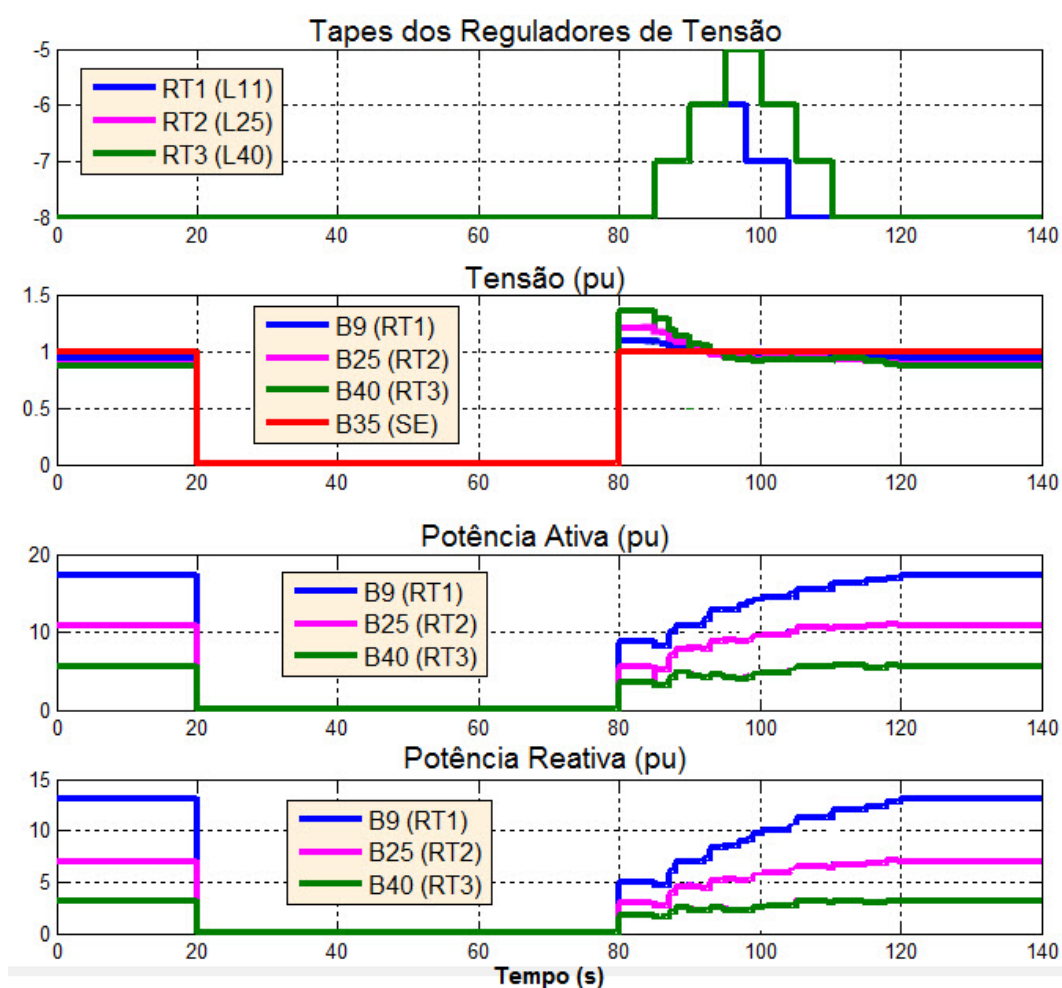


Figura 33 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional

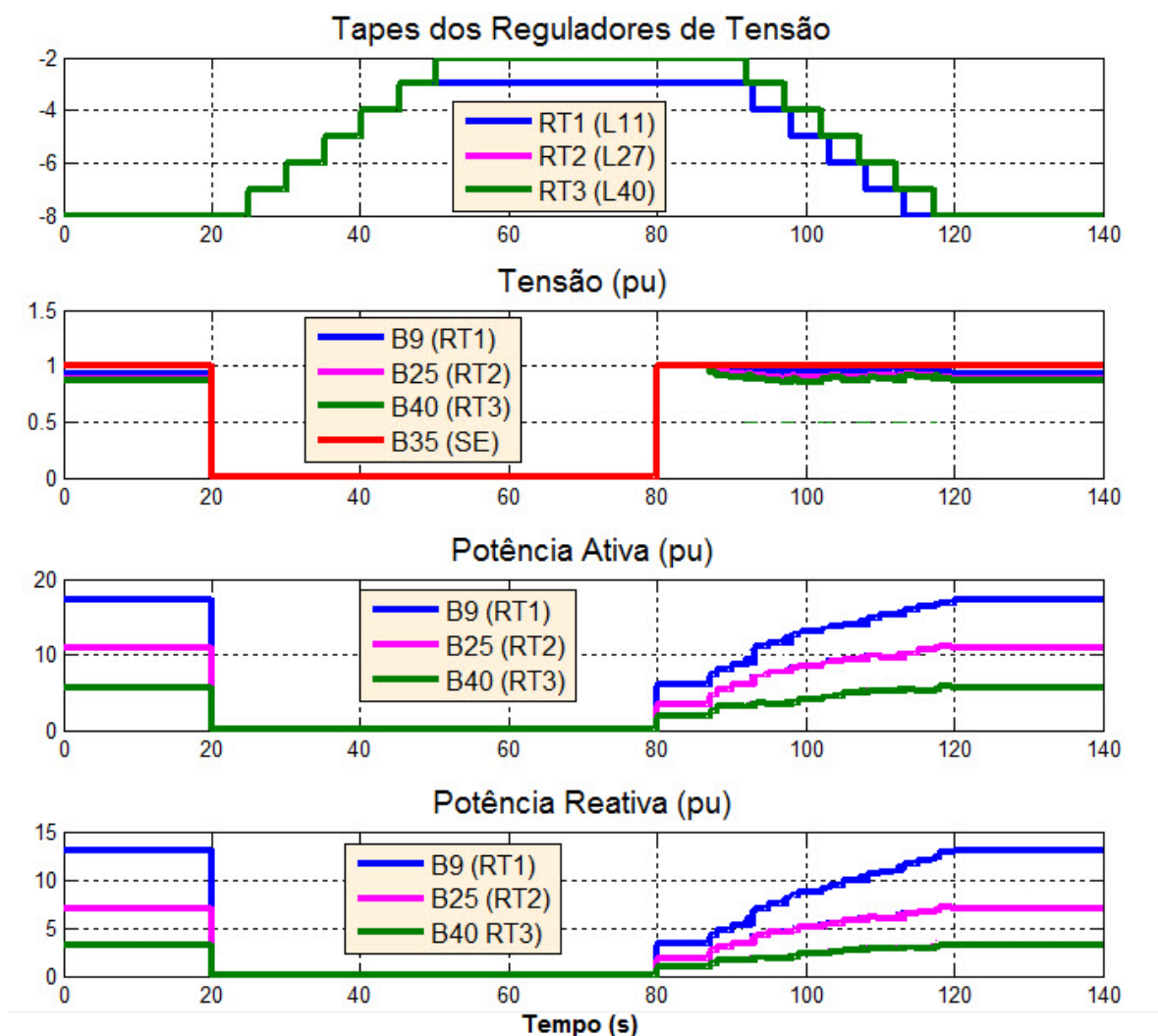


Figura 34 – Caso 1: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto

Verifica-se na Figura 33 a situação na qual o ajuste de *tap's* dos reguladores de tensão é realizado pelo controle convencional destes equipamentos. Na situação pré-interrupção de energia (operação em regime permanente normal do alimentador antes de 20 s), os *tap's* dos três reguladores de tensão conectados à rede se encontravam na posição -8 (elevação de tensão) para compensar a queda de tensão existente ao longo do alimentador. Durante a interrupção de energia (20 a 80 s) os *tap's* dos três reguladores de tensão continuam fixos nestas mesmas posições. Em função dos *tap's* dos reguladores de tensão estarem previamente ajustados para uma situação na qual o carregamento era mais pesado, no momento do restabelecimento da energia no alimentador, elevações de tensão de 9%, 21% e 35% ocorrem à jusante dos reguladores de tensão conectados às barras B9, B15 e B40, respectivamente, conforme pode-se verificar na Figura 33.

Os níveis de tensão observados no momento do restabelecimento de energia, a jusante das barras B15 e B40, estão consideravelmente acima daqueles estipulados pela legislação vigente (ANEEL, 2011) e caracterizam elevações de tensão de curta duração.

Na simulação onde o método proposto para efetuar a seleção ótima de *tap's* do regulador (Figura 34) é implementado, quando ocorre a interrupção de energia (20 a 80 s) e há mudança no perfil de cargas conectadas ao alimentador, no momento do restabelecimento de energia (após 80 s) os *tap's* dos reguladores de tensão já estão adequados ao novo perfil de cargas conectadas ao alimentador. Neste caso as posições ótimas identificadas e ajustadas pelo controle supervisorio proposto no método desenvolvido corresponderam à -3 para o RT1 e -2 para os RTs 2 e 3. Portanto, enquanto o fornecimento de energia está interrompido (20 – 80 s), os *tap's* foram mudados da posição -8, ideal para o momento anterior à interrupção (antes de 20 s), para as posições ótimas identificadas para o novo perfil de cargas do momento do restabelecimento (após 80 s), evitando assim que elevações de tensão fossem transmitidas às cargas que ainda permaneceram conectadas ao alimentador. As tensões nas barras B9 (RT1), B25 (RT2) e B40 (RT3) no momento do restabelecimento de energia são respectivamente 1,004 pu, 1 pu e 0,996 pu, ou seja, aproximadamente iguais à 1 pu.

Assim que ocorre o restabelecimento de energia, a seleção dos *tap's* volta a ser realizada através do controle convencional do regulador de tensão e os *tap's* vão se adequando conforme as cargas pesadas são reinseridas no sistema. Neste caso, em função dos tempos de reinserção das cargas no sistema serem diferentes daqueles definidos para a simulação do caso 1 do alimentador de 36 barras, nota-se que não há a presença dos afundamentos de tensão gerados naquele caso. Os níveis de tensão que ocorrem após o restabelecimento chegam a um valor mínimo igual aquele valor observado em regime permanente.

6.4.1.1 Mudança para o tap neutro

Paralelamente ao método desenvolvido para efetuar a seleção ótima dos *tapes* dos reguladores de tensão durante interrupções de energia cabe ressaltar que, um ajuste adicional ao controle convencional do regulador de tensão que efetuasse durante estas interrupções de energia a mudança do *tap* previamente

ajustado para o tap neutro possivelmente minimizaria a geração de elevações de tensão na rede nas situações tratadas.

Visando avaliar esta alternativa, para este estudo de caso, aplicou-se na lógica do controle convencional dos reguladores de tensão um comando que ao se ter tensão nula na entrada destes equipamentos o tap deve ser ajustado para a posição 0 ou chamado tap neutro.

Na Figura 35 pode-se verificar os resultados da simulação com o controle alternativo para ajuste de tap's dos reguladores de tensão.

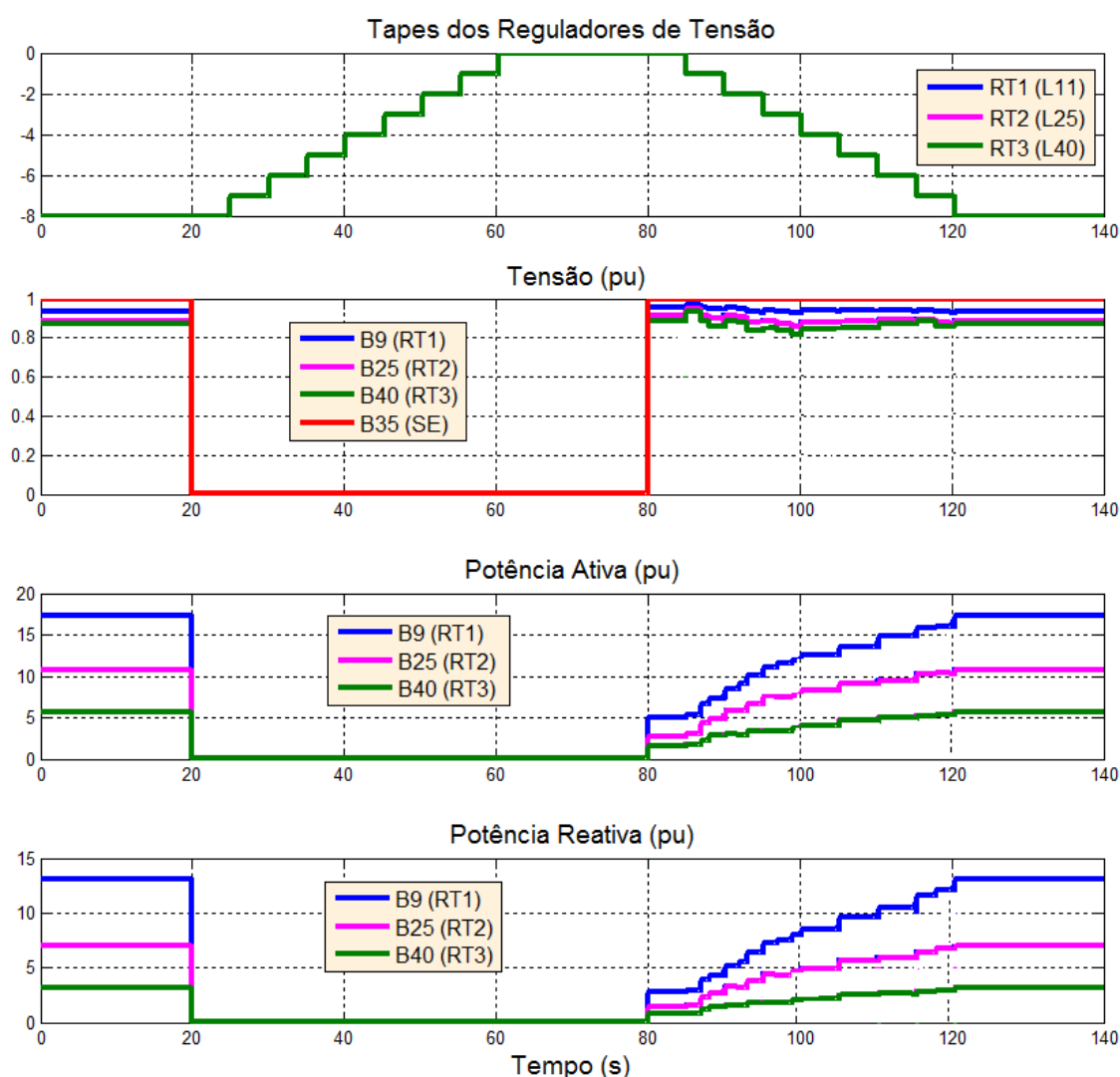


Figura 35 – Caso 1: Regulador de Tensão com Controle Alternativo

Neste caso, pode-se verificar na Figura 35 que quando ocorre a interrupção de energia, entre 20 e 80 s, os tap's dos três reguladores de tensão que se encontravam na posição -8 são alterados para a posição 0. Desta maneira, quando ocorre o restabelecimento de energia, as tensões nas saídas dos reguladores de tensão estão no mesmo nível das tensões na entrada destes equipamentos, não havendo regulação, pois o tape está ajustado em 0. Estes níveis de tensão estão abaixo de 1 pu, pois há queda de tensão ao longo do alimentador, entretanto, a diferença em relação à 1 pu é muito inferior àquela originada quando apenas o controle convencional do regulador atua e os níveis de tensão ficam consideravelmente acima de 1 pu (elevações de tensão de curta duração).

Desta maneira, pôde-se observar que adicionando ao controle convencional dos reguladores de tensão um comando que efetue a mudança dos tap's destes equipamentos para o tap neutro em situações de interrupção de energia melhoraria o nível de tensão a jusante dos reguladores, entretanto, essa melhora não estaria otimizada como no caso da aplicação do método proposto com ajuste de tapes através de um controle supervisor.

6.4.2 Caso 2 – Falta ao Longo do Alimentador

No estudo de caso 2 simulou-se uma falta entre as barras 25 e 26, na entrada do RT2 da Figura 32. Na Figura 36 e na Figura 37 pode-se verificar que as tensões na barra B25 (RT2) e na barra B40, barra do RT3 que está conectada em série ao RT2, são nulas entre os instantes de tempo de 20 a 80 s, caracterizando a interrupção de energia. Nota-se também que as tensões nas barras B35 (SE) e B9 (RT1) permanecem diferentes de zero, pois a interrupção de energia ocorreu a jusante destes pontos no alimentador de 55 barras.

Como a falta ocorreu em um local ao longo do alimentador, as cargas que estão conectadas a montante do ponto da falta continuam conectadas ao alimentador, mesmo que possuam proteções locais, pois para estas cargas a tensão em nenhum momento será nula. Portanto, apenas as cargas conectadas a jusante do local da falta que possuem proteções próprias não estarão conectadas ao alimentador no momento do restabelecimento de energia (80 s). Estas cargas correspondem àquelas das barras 29, 30, 31, 37, 39, 42, 44, 47, 51, 52 e 53 da Tabela 2 do Anexo B. Pode-se notar tanto na Figura 36 como na Figura 37 que o

perfil de potências ativa e reativa conectadas ao RT2 e RT3 é nulo durante a interrupção de energia (20 – 80 s), enquanto que, no RT1 o perfil de cargas apenas é reduzido proporcionalmente às cargas que estão conectadas após o local da falta. Após o restabelecimento (80 s) as cargas leves localizadas após o ponto da falta voltam a estar conectadas ao alimentador e as cargas pesadas são reinseridas no sistema de maneira gradativa entre 7 e 19 s (87 a 99 s da simulação).

A situação pré-interrupção de energia (0 – 20 s) corresponde à situação em que o sistema operava em sua condição normal, com os *tap's* dos reguladores ajustados de maneira a evitar a transgressão dos limites de tensão estipulados pela legislação.

Os resultados obtidos nas simulações para o caso do controle convencional e para o método proposto estão apresentados, respectivamente, na Figura 36 e na Figura 37.

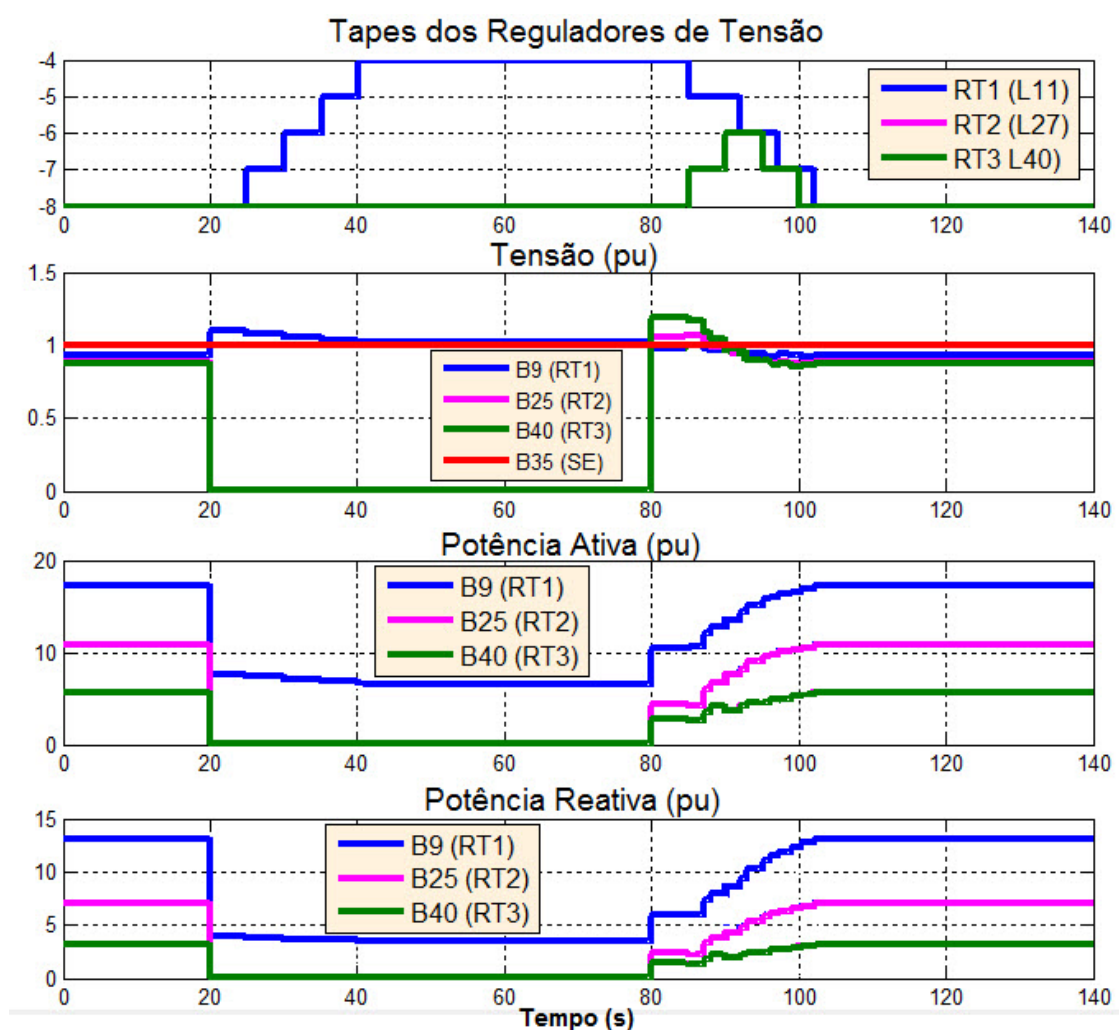


Figura 36 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle Convencional

Nota-se na Figura 36 que, na situação pré-interrupção de energia (0 a 20 s), quando o sistema operava em sua condição normal, os *tap's* dos três reguladores de tensão estavam ajustados na posição -8 para compensar a queda de tensão ao longo do alimentador. Com o controle convencional para ajuste dos *tap's* dos reguladores de tensão, quando ocorre a interrupção de energia, os *tap's* dos reguladores RT2 e RT3 permanecem fixos nestas mesmas posições, pois a tensão na entrada destes reguladores (B25 e B40) é nula, situação na qual segundo o controle convencional dos reguladores de tensão não ocorre comutação de *tap's*. Já no RT1, que permanece conectado ao alimentador, a mudança do perfil de cargas (nenhuma carga que estava conectada a jusante do ponto da falta está mais conectada) faz com que haja um aumento do nível de tensão na barra B9 e o *tap* do RT1 é ajustado para a posição -4 visando adequar o nível da tensão ao novo perfil de cargas.

No momento do restabelecimento de energia as cargas localizadas a jusante do ponto da falta e que não possuem proteções próprias já estão reconectadas no sistema, entretanto, aquelas que possuem ainda não. Como os *tap's* do RT2 e RT3 não foram alterados para este perfil de cargas, os níveis de tensão gerados respectivamente nas barras B25 e B40 são de 1,062 pu e 1,201 pu. Portanto, elevações de tensão de curta duração da ordem de 20 % são geradas a jusante do RT3.

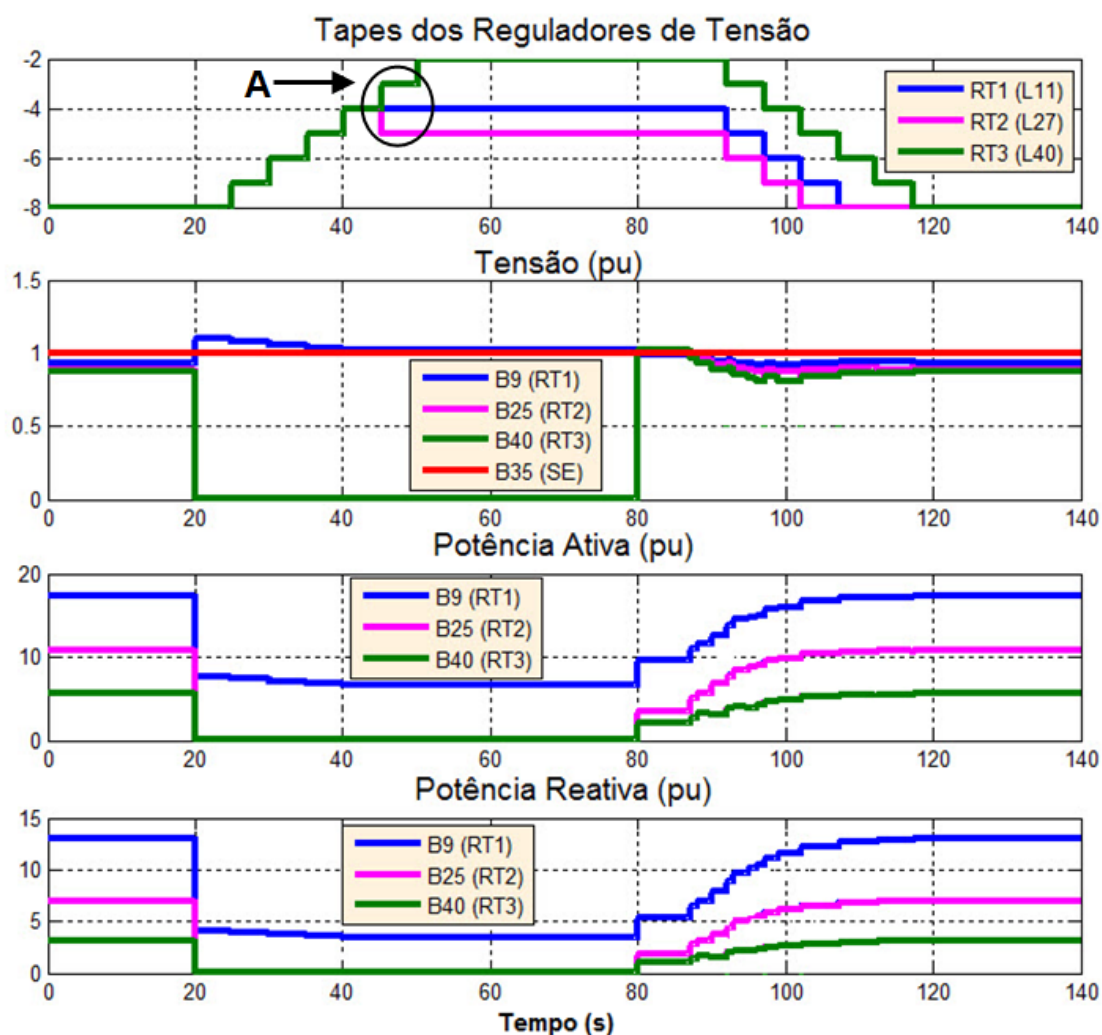


Figura 37 – Caso 2: Regulador de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto

Neste estudo de caso, ao aplicar o método desenvolvido, quando ocorre a interrupção de energia (20 – 80 s), as cargas conectadas a jusante do RT2 (incluindo aquelas a jusante do RT3) são desconectadas do alimentador, e desta maneira o perfil de cargas conectadas ao RT1 é reduzido. Como este RT continua conectado ao alimentador, seu controle convencional realiza a mudança do *tap* -8 para o *tap* -4 visando compensar a elevação de tensão provocada pela alteração no perfil de cargas. Paralelamente, o ajuste de *tap*'s do RT2 e do RT3, que estão desconectados do alimentador em função da interrupção de energia, é realizado pelo controle supervisorio proposto de modo a estar adequado para o perfil de cargas que estarão conectadas ao alimentador no momento do restabelecimento de energia (cargas pesadas desconectadas).

Portanto, como os *tap's* do RT1 são alterados durante a interrupção de energia, pois o sistema é dinâmico e este regulador continua conectado ao alimentador, enquanto há a transição do *tape* deste RT da posição -8 até a posição -4, cada uma das posições intermediárias é fornecida como dado de entrada para a solução do ajuste ótimo dos *tap's* do RT2 e do RT3. Conforme descrito no item 5.3 desta dissertação, o método proposto leva em consideração a posição dos *tap's* dos reguladores de tensão que estão conectados a montante daquele para o qual está sendo realizado o ajuste ótimo. Desta maneira, por exemplo, pode-se notar na região **A** em destaque na Figura 37 que, enquanto a posição do *tap* do RT1 estava em -5, havia-se identificado como ótima a posição -4 para os RTs 2 e 3, entretanto, quando a posição do RT1 é alterada para -4 as posições ótimas para o RT2 e o RT3 são respectivamente -5 e -2. Assim as tensões nas barras B25 (RT2) e B40 (RT3) no momento do restabelecimento de energia são, respectivamente, 1,018 e 1,015 pu e fica evidente que, mesmo que haja mudança nos *tap's* do regulador que continua conectado ao sistema, o método proposto leva em consideração esta mudança para identificar a posição ótima para os *tapes* daqueles reguladores que estão desconectados do sistema de modo a evitar que elevações de tensão ocorram no momento do restabelecimento de energia.

Posteriormente ao restabelecimento (após 80 s), o método contempla o retorno do ajuste dos *tapes* dos três reguladores de tensão pelo seu controle convencional, já que as tensões em suas entradas não são nulas, de modo a adequar os *tapes* visando manter o perfil de tensão ao longo do alimentador em cumprimento aos limites estabelecidos pela legislação vigente. Neste caso, em função do tempo de retorno daquelas cargas pesadas, um afundamento de tensão da ordem de 0,86 pu ocorreu a jusante do RT3.

7 CONCLUSÕES

Em situações de interrupções de energia em sistemas com características de cargas pesadas e leves em um mesmo alimentador com reguladores de tensão, o ajuste de *tap's* proporcionado pelo controle convencional dos reguladores de tensão faz com que os *tap's* destes equipamentos permaneçam fixos nas mesmas posições que se encontravam anteriormente à interrupção de energia. Esta dissertação mostrou que isto pode ocasionar sobretensões na rede de distribuição a jusante da localização dos reguladores de tensão e, conseqüentemente, danos elétricos aos consumidores conectados a esta.

Nos estudos de caso realizados, com diferentes localizações de faltas em dois alimentadores de distribuição distintos, verificou-se que quando há uma interrupção de energia que afete a tensão de entrada dos reguladores de tensão e o alimentador possui cargas com proteções locais conectadas e apenas o controle convencional dos reguladores de tensão atua nestes equipamentos, elevações de tensão de curta duração foram geradas. Foi evidenciado que, particularmente em alimentadores de distribuição que contam com reguladores de tensão conectados em série, os níveis de elevações de tensão de curta duração que podem ser gerados no sistema no momento do restabelecimento de energia, são ainda mais elevados.

A fim de contornar a violação dos limites de tensão estabelecidos pela legislação, esta dissertação propôs um método que adiciona um controle supervisorio em paralelo ao controle convencional dos reguladores de tensão para efetuar a seleção ótima dos *tap's* destes equipamentos através de um fluxo de potência ótimo durante a interrupção de energia. Quando ocorre o restabelecimento do sistema, o *tap* já está ajustado de acordo com o novo perfil de cargas conectado ao sistema e, posteriormente ao restabelecimento, o ajuste volta a ser feito através do controle convencional do regulador. Assim, não são geradas sobretensões no sistema, conforme o objetivo pretendido nesta dissertação.

Em todos os estudos de caso aqui apresentados, quando o método proposto foi implementado, adicionando um controle supervisorio para o ajuste de *tap's* dos reguladores de tensão, o mesmo se mostrou eficaz, mitigando as elevações de tensão de curta duração.

No caso de situações nas quais não seria necessária a atuação do controle supervisão proposto pôde-se verificar que o método proposto não resultaria em um ajuste equivocado para os *tap's* dos reguladores de tensão.

Cabe ressaltar a importância do emprego do método proposto de maneira “on-line”, exemplificado no estudo de caso no qual um dos reguladores de tensão teve seu ajuste de *tap's* realizado pelo controle convencional e os demais através do método proposto. Este emprego “on-line” do método proposto é possível, já que o tempo para solução do fluxo de potência ótimo e identificação dos *tapes* ótimos para o momento do restabelecimento de energia, quando o controle supervisão está atuando, é muito inferior ao tempo de comutação entre *tapes* dos reguladores de tensão.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

A implementação do método proposto na prática em reguladores de tensão pode parecer complexo, entretanto, considerando que na filosofia do *Smart Grid*, haverá maior facilidade no monitoramento dos parâmetros da rede, vislumbra-se que o método tem possibilidades de ser implementado. Nesse caso, seriam necessárias alterações no circuito de controle dos reguladores de tensão que permitissem a entrada de comandos em função das respostas obtidas no fluxo de potência ótimo do sistema em tempo real durante interrupções de energia.

Fica demonstrada, também nesta dissertação, a vantagem do uso de reguladores de tensão dotados de potencial de programação de seus *tap's* para a condição de religamento após uma falta, no que tange a elevações de tensão. Estes reguladores de tensão possuem tempo para comutação entre *tapes* muito inferior, da ordem de 0,5 ciclo de onda, em comparação aos reguladores com princípio eletromecânico que necessitam em média de 5 s. Com a utilização de reguladores com tecnologia de eletrônica de potência o método proposto seria ainda mais eficaz, principalmente após o restabelecimento de energia, quando as cargas pesadas são gradativamente reinseridas no sistema, e o regulador poderia ter seus *tapes* ajustados rapidamente para estas mudanças no perfil de cargas.

Cabe ressaltar também, que um ajuste adicional ao controle convencional do regulador de tensão que efetuasse durante interrupções de energia a mudança do *tap* previamente ajustado para o *tap* neutro minimizaria a possibilidade da geração

de elevações de tensão na rede nas situações tratadas. Entretanto, não haveria garantias que as mesmas não seriam eliminadas.

Além disso, pode-se vislumbrar como avanço deste trabalho implementar, em paralelo ao método proposto, um mecanismo para a detecção do estado das cargas visando estimar o estado pós-distúrbio de modo mais eficaz que o atualmente proposto. Existe aí a possibilidade de implementar uma melhor estimativa para o estado de cargas no momento do restabelecimento de energia através de uma distribuição de probabilidades para as cargas na formulação do fluxo de potência ótimo. Outra possibilidade seria considerar uma faixa de valores dentro das quais a carga poderia estar e através de estratégias de controle identificar qual seria o pior caso e para este caso solucionar o FPO. De maneira geral, o estudo destas e outras possibilidades para realizar essa estimativa seria um grande avanço para este trabalho. A utilização de outras modelagens para as cargas, como carga com potência ativa e reativa constantes no ambiente de simulação ou carga zip no ambiente de simulação e na formulação do FPO, e a implementação do FPO trifásico no método proposto poderiam trazer contribuições ao trabalho.

A avaliação de estudos de caso de alimentadores com maior complexidade, por exemplo, que contem com mais de uma opção de alimentação principal (SE), ramais seccionados, geração distribuída, etc., também pode ser explorada em trabalhos futuros. O estudo do comportamento do método em alimentadores com estas características abriria campo para identificar a necessidade do controle dos tapes ser realizado local ou globalmente, principalmente, já que neste trabalho partiu-se da premissa que a topologia da rede não muda, ou seja, não contemplando a existência de *self-healing* no “*smart grid*” para operação dos sistemas elétricos.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 11809, *Reguladores de Tensão – Especificação*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1992.
- ABREU J. P. G, ARANGO H., OLIVEIRA J. C., BUENO A. M., e SELENIO R. S., *Reflexões sobre a Qualidade da Energia*, I SBQEE, Uberlândia, 1996.
- AFONSO J. L., e MARTINS J. S., *Qualidade da Energia Elétrica*, O Electricista, 2004, no. 9, pp. 66-71.
- ALSAÇ O., BRIGHT J., PRAIS M., STOTT B., *Further Developments in LPBased Optimal Power Flow*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 5, 1990.
- ALVES M. L., *Módulo de Alocação Otimizada de Reguladores de Tensão e Bancos de Capacitores em Alimentadores de Distribuição*, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, vol. 8, no. 2, 2011.
- ANSI/IEEE STD. C57.15-1986, *Terminology, and Test Code for Step-Voltage and Induction-Voltage Regulators*, IEEE Standard Requirements, 1986.
- AREDES M., e ENCARNAÇÃO L., *Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração*, CBQEE VIII, vol. 1, 2009.
- ARRUDA E. F., *Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet*, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2003.
- BAUER P., *New Robust Switching Commutation for a Tap Changer*, Proceedings of European Power Electronics – EPE, Toulouse, 2003.

BOLLEN M., *Understanding Power Quality Problems*, IEEE Press Series, Power Engineering, 2000.

BOONCHIAM N., MITHULANANTHAN P., *Dynamic Control Strategy in Medium Voltage DVR for Mitigating Voltage Sags/Swells*, International Conference Power System Technology, 2006.

CARPENTIER J., *Contribution à L'étude du Dispatching Économique*, Bulletin dela Société Française des Electriciens, Ser. 8, Vol. 3, p. 431-447, 1962.

CARRARO E., MARQUES R. F., BENEDIK C. R., ALVES M. E. G., *Experiência com Relé Regulador de Tensão com Ajustes Múltiplos Programáveis*, XVII SENDI, Belo Horizonte, MG, Agosto de 2006.

CARVALHO FILHO J. M., *Qualidade da Energia Elétrica-I*, Tese de Doutorado na Universidade Federal de Itajubá, 1997.

CARVALHO P. L., *Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão*, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de Itajubá. 1997.

CHUNG U., WON D., KIM J., AHN S., MEMBER S., MOON S., SEO J., e CHOE J., *Development of Power Quality Diagnosis System for Power Quality Improvement*, Power Engineering Society General Meeting, vol. 2, pp. 1256–1261, 2003.

CIGRÉ - Grupo de Trabalho Conjunto JWG A2/C4-03, *Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência*, CIGRÉ – Brasil, Maio, 2011.

DECKMANN S. M., FERRIRA A. A., *About Voltage Sags and Swells Analysis*, 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, vol.1, pp.144,148, 2002.

DOMMEL H. W., e TINNEY W. F., *Optimal Power Flow Solutions*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 87, 1968.

DUGAN R. C. et al, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed, McGraw-Hill, New York, 2002.

EN 50160, *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*, CÉNÉLEC - European Committee for Electrotechnical Standardization, 1994.

FELÍCIO J. R., *Modelagem de Regulador de Tensão Monofásico com 32 Degraus para Estudos em Regime Permanente e Transitório*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

GRANVILLE S., *Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Methods*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, 1994.

IEC 61000-1-1-1992, *Eletromagnetic compability (EMC), Part 1: General, Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms*, 1992.

IEC 61000-4-30:2003, *Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*, pp. 81, 78 e 19, 2003.

IEEE STD. 100-1996, *The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms*, 1996.

IEEE STD. 1100-1992, *IEEE recommended practice for powering and grounding sensitive electronic equipment*, 1992.

IEEE STD. 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995), *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol., no., pp.c1,81, June 2009.

IEEE STD. 446-1995, *Recommended for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*, 1995.

IEEE STD. 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, 1993.

ITI (CBEMA) Curve Application Note, *Information Technology Industry Council*, <http://www.itic.org>, último acesso em Abril 2013.

KAJIHARA H. H., *Quality Power for Electronics*, Electro-Technology, vol. 82, no. 5, November 1968.

KERSTING W.H., *Radial distribution test feeders*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp.908, 912 vol.2, 2001.

KUSKO A., THOMPSON M. T., *Power Quality in Electrical Systems*. McGraw-Hill, 2007.

LAMORRE J., VINETT P., JONES W., e SAMOTYJ M., *Voltage Sag Analysis Case Studies*, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 30, n. 4 p. 1083-1088, July/August, 1994.

LATORRE M. L., *Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a Resolução de Problemas de Fluxo de Potência Ótimo*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.

MACGRANAGHAN M. F., MUELLER D. R., e SAMOTYJ M. J., *Voltage Sags in Industrial Systems*, IEEE Transaction on Industry Applications, v. 29, n. 2, p. 397-403, Mar/Apr, 1993.

MARTZLOFF F. D, e GRUZS T. M., *Power Quality Site Surveys: Facts, Fiction, and Fallacies*, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 24, n. 6, p. 1005-1018, Nov/Dec, 1988.

MONTEIRO T. C., CAMARGO J., AHN S. U., E BORMIO., TERRAZAS T. M., MARAFAO F. P., GIARETTA A. R., JARDINI J. A., MATAKAS L., e KOMATSU W., *Dynamic Voltage Restorer Development and Testing*, Power Electronics Conference (COBEP), pp. 341,346, 11–15, 2011.

OLIVEIRA J. C. D., *Projeto SIDAQEE - Capítulo II Qualidade da Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade*, Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

QUINTANA V. H., TORRES G. L., e MEDINA-PALOMO J., *Interior-point methods and their applications to power systems: A classification of publications and software codes*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 1, pp. 170-176, 2000.

RODRIGUES A. R., *Regulador de Tensão com Comutação Eletrônica de Taps – Análise de Operação e Proteção das Chaves Estáticas*, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SABIN D., *An assessment of distribution system power quality*, Statistical Summary Report, vol. 2, 1996.

SANTOS S. L. F., OLIVEIRA G. H. C., e FERNANDES T. S. P., *Mitigação de VTCD em Alimentadores de Distribuição com Bancos de Reguladores de Tensão em Situações de Interrupção de Energia*, CBQEE X, 2013.

SHORT T. A., *Electric Power Distribution Handbook*, New York: CRC Press, 2003.

SUNDARAM A., MEHTA H., TAHILIANI E V., *Custom Power EPRI's Response to Power Quality Issues*, Conference Record Southcon, pp.398,403, USA, 1994.

SUN D. I., ASHLEY B. T., BREWER B. J., HUGHES B. A., TINNEY W. F., *Optimal Power Flow by Newton Approach*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No. 10, 1984.

SZUVOVIVSKI I., *Alocação Simultânea de Bancos de Capacitores e Reguladores De Tensão em Sistemas de Distribuição usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo*, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2008.

TOSHIBA, *O que Interessa saber sobre os Reguladores de Tensão Monofásicos com 32 Degraus*, Manual Técnico, 2000.

WAGNER V., GREBE T., KRETSCHMANN R., MORGAN L., *Power System Compatibility Process Equipment*, IEEE Industry Application Magazine, p. 11-15, Jan/Feb, 1996.

WEG ELETROMOTORES, *Manual de Motores Elétricos*, 1990.

APÊNDICE A - MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES

Para utilizar o MPDPI ao problema formulado no Capítulo 4, faz-se a transformação das restrições de desigualdade para restrições de igualdade pela introdução de variáveis de folga estritamente positivas.

No MPDPI as variáveis de folga são incorporadas à função objetivo por meio de uma função de penalização, denominada barreira logarítmica. Assim, o problema original é transformado em uma sequência de problemas parametrizados pelo parâmetro barreira.

Ao incorporar a barreira logarítmica, o MPDPI busca resolver o problema de otimização para cada valor do parâmetro barreira, fazendo com que o parâmetro barreira tenda a zero. Assim, para cada valor do parâmetro barreira executa-se uma iteração do Método de Newton-Raphson no sistema de equações não-lineares definidos pelas condições de otimalidade de primeira ordem.

Uma vez obtido os pontos estacionários da função Lagrangeana estabelece-se critérios para atualização do parâmetro barreira, para inicialização das variáveis e teste de convergência completando assim uma iteração do FPO via MPDPI.

A formulação matemática do FPO via MPDPI está apresentada a seguir.

O problema de FPO pode ser representado de forma genérica como:

$$\min f(\mathbf{z}) \quad (\text{A.1})$$

Sujeito a:

$$g(\mathbf{z}) = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$h^{\min} \leq h(\mathbf{z}) \leq h^{\max} \quad (\text{A.3})$$

onde

\mathbf{z} é o vetor de variáveis do problema;

$f(\mathbf{z})$ é a função objetivo;

$g(\mathbf{z})$ é o vetor de restrições de igualdade;

$h(\mathbf{z})$ é o vetor de restrições de desigualdade.

Para utilizar os métodos de Pontos Interiores aplicam-se ao problema (A.1) à (A.3) os seguintes procedimentos:

a. Transformação das restrições de desigualdade em restrições de igualdade pela introdução de variáveis de folga.

Desta forma, as restrições passam a ser representadas da seguinte maneira:

$$h(\mathbf{z}) - h^{min} - s^{min} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$h(\mathbf{z}) - h^{max} + s^{max} = 0 \quad (\text{A.5})$$

onde

s^{min} – vetor de variáveis de folga mínimas estritamente positivas;

s^{max} – vetor de variáveis de folga máximas estritamente positivas.

b. Introdução da função barreira logarítmica na sua função objetivo.

A fim de se representar as restrições de não negatividade das variáveis de folga, o problema é modificado com a introdução da função barreira logarítmica na sua função objetivo. A função barreira penaliza as estimativas de solução que se encontram próximas aos limites das desigualdades, ou ainda, associadas às variáveis de folga próximas de zero.

O problema modificado passa a ser assim representado:

$$\min f(\mathbf{z}) - \mu \sum_i^{ndes} [\ln(s_i^{min}) + \ln(s_i^{max})] \quad (\text{A.6})$$

Sujeito a:

$$g(\mathbf{z}) = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$h(\mathbf{z}) - h^{min} - s^{min} = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$h(\mathbf{z}) - h^{max} + s^{max} = 0 \quad (\text{A.9})$$

onde

$ndes$ – número de restrições de desigualdade;

μ – parâmetro barreira ($\mu \geq 0$).

Logo, a função Lagrangeana associada a este problema é:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{z}, \lambda, \pi^{min}, \pi^{max}, s^{min}, s^{max}) = & f(\mathbf{z}) - \mu \sum_i^{ndes} [\ln(s_i^{min}) + \ln(s_i^{max})] \\ & + \lambda^T \cdot g(\mathbf{z}) + (\pi^{min})^T \cdot [h(\mathbf{z}) - h^{min} - s^{min}] + \\ & + (\pi^{max})^T \cdot [h(\mathbf{z}) - h^{max} + s^{max}] \end{aligned}$$

onde

λ – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade com dimensão ($nig \times 1$);

π^{min} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites mínimos com dimensão ($ndes \times 1$);

π^{max} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites máximos com dimensão ($ndes \times 1$);

nig – número de restrições de igualdade.

Portanto, o novo problema de otimização passa a ser:

$$\min L(z, \lambda, \pi^{min}, \pi^{max}, s^{min}, s^{max}) \quad (A.11)$$

Sujeito a:

$$s^{min} \geq 0, s^{max} \geq 0, \pi^{min} \geq 0, \pi^{max} \geq 0 \quad (A.12)$$

Sendo as restrições (A.12) impostas para que a equivalência com o problema (A.1) a (A.3) seja mantida.

A.1 CONDIÇÕES DE OTIMALIDADE

Um ponto $z = [z^T \lambda^T (\pi^{min})^T (\pi^{max})^T (s^{min})^T (s^{max})^T]^T$ é solução do problema (A.11) e (A.12) somente se:

a. Satisfaz as condições necessárias de otimalidade de primeira ordem, ou condições de Karush-Kuhn-Tucker – KKT.

Para que as expressões matemáticas presentes nas condições de KKT e nos algoritmos descritos sejam compactas foi usado o operador ∇ para representar derivadas parciais de funções, desta forma tem-se:

$$\nabla_z z = 0 \Rightarrow \nabla_z f(z) + [\nabla_z g(z)]^T \cdot \lambda + [\nabla_z h(z)]^T \cdot (\pi^{min} + \pi^{max}) = 0 \quad (A.13)$$

$$\nabla_z L(z) = 0 \Rightarrow g(z) = 0 \quad (A.14)$$

$$\nabla_{\pi^{min}} L(z) = 0 \Rightarrow h(z) - h^{min} - s^{min} = 0 \quad (A.15)$$

$$\nabla_{\pi^{max}} L(z) = 0 \Rightarrow h(z) - h^{max} - s^{max} = 0 \quad (A.16)$$

$$\nabla_{s^{min}} L(z) = 0 \Rightarrow -\mu \cdot e - s^{min} \cdot \pi^{min} = 0 \quad (A.17)$$

$$\nabla_{s^{\max}} L(z) = 0 \Rightarrow -\mu \cdot e - S^{\max} \cdot \pi^{\max} = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$s^{\min} \geq 0, \quad s^{\max} \geq 0, \quad \pi^{\min} \geq 0, \quad \pi^{\max} \geq 0 \quad (\text{A.19})$$

sendo

$e = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$, com dimensão ($ndes \times 1$);

S^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\min} ;

S^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\max} .

b. Se a Hessiana do Lagrangeano L' :

$$L'(z, \lambda, \pi^{\min}, \pi^{\max}) = f(z) + \lambda^T \cdot g(z) + \pi_A^T \cdot h_A(z) \quad (\text{A.20})$$

onde

$h_A(z)$ – vetor das restrições de desigualdade ativas;

π_A^T – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições desigualdade ativas.

O Método de Pontos Interiores se concentra em obter um ponto estacionário, isto é, que satisfaça as condições necessárias de otimalidade do item (a). Para se garantir que o ponto obtido seja um mínimo de global de (B.1) a (B.3) as condições suficientes do item (b) devem ser testadas após a convergência do método.

No procedimento usado, entretanto, considera-se como ótimo o ponto solução das condições de KKT.

A.2 ALGORITMOS PRIMAL DUAL DE PONTOS INTERIORES

Após a transformação das restrições de desigualdade em igualdades, por meio da introdução de variáveis de folga e adição da função barreira logarítmica à função objetivo como forma de garantir a não negatividade dessas variáveis. Os passos seguintes consistem em se obter os pontos estacionários da função Lagrangeana, utilizando-se o Método de Newton, e estabelecer critérios para atualização do parâmetro barreira, para inicialização das variáveis e teste de convergência.

A.3 OBTENÇÃO DOS PONTOS ESTACIONÁRIOS

O primeiro passo na obtenção dos pontos que satisfazem a função Lagrangeana consiste em se fazer uma estimativa desta solução pela linearização das Equações (A.13) a (A.18) utilizando-se o Método de Newton. Os incrementos obtidos em cada iteração deste método não podem ser usados diretamente no vetor z , pois os mesmos podem violar as restrições de desigualdade. Assim, esses incrementos devem ser testados e, se necessário, modificados a fim de sempre se manter o vetor z dentro da região de factibilidade do problema.

As etapas que devem ser seguidas a fim de se obter os pontos estacionários são as seguintes:

a. Inicialização das Variáveis

A fim de se começar o processo de otimização, é necessário a obtenção de uma estimativa inicial para as variáveis do problema. A escolha é feita de tal modo que as variáveis sejam estritamente internas aos limites impostos pelas restrições de desigualdade do problema. Para tanto, as variáveis z são inicializadas pela metade da soma de seus valores máximos e mínimos; posteriormente, as variáveis de folga são calculadas a partir das Equações (A.15) e (A.16) e, arbitrando um valor inicial para o parâmetro barreira μ , os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade são calculados a partir das Equações (A.17) e (A.18). Para os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade estimam-se valores quaisquer, como por exemplo, o vetor unitário.

b. Método de Newton

O sistema de Equações (A.13) a (A.18) pode ser representado de forma como:

$$\rho(z) = 0 \quad (\text{A.21})$$

Tomando uma aproximação linear do sistema (A.21) no ponto z^* tem-se:

$$\rho(z^* + \Delta z) = \rho(z^*) + \nabla_z \cdot \rho(z) \Big|_{z^*} \Delta z \quad (\text{A.22})$$

Como Δz deve ser tal que $\rho(z^* + \Delta z) = 0$, da Equação (A.22) tem-se que:

$$\nabla_z \cdot \rho(z) \Big|_{z^*} \Delta z = -\rho(z^*) \quad (\text{A.23})$$

Em termos das variáveis do problema: u , λ , π^{\min} , π^{\max} , s^{\min} e s^{\max} a Equação (A.23) pode ser escrita como:

$$W \cdot \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta \lambda \\ \Delta \pi^{\min} \\ \Delta \pi^{\max} \\ \Delta s^{\min} \\ \Delta s^{\max} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_z f(z) + [\nabla_z g(z)]^T \cdot \lambda + [\nabla_z h(z)]^T \cdot (\pi^{\min} + \pi^{\max}) \\ g(z) \\ h(z) - h^{\min} - s^{\min} \\ h(z) - h^{\max} - s^{\max} \\ -\mu \cdot e - S^{\min} \cdot \pi^{\min} \\ -\mu \cdot e - S^{\max} \cdot \pi^{\max} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_z L \\ \nabla_\lambda L \\ \nabla_{\pi^{\min}} L \\ \nabla_{\pi^{\max}} L \\ \nabla_{s^{\min}} L \\ \nabla_{s^{\max}} L \end{bmatrix} \quad (\text{A.24})$$

onde

W – matriz Hessiana de dimensão $(nz \times nz)$;

nz – número total de variáveis em z .

Ou seja:

$$W = \begin{bmatrix} L_{zz} & L_{z\lambda} & L_{z\pi^{\min}} & L_{z\pi^{\max}} & 0 & 0 \\ [L_{z\lambda}]^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [L_{z\pi^{\min}}]^T & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ [L_{z\pi^{\max}}]^T & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & -S^{\min} & 0 & -\Pi^{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S^{\max} & 0 & \Pi^{\max} \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

Sendo:

$$L_{zz} = \nabla_{zz}^2 L = \nabla_{zz}^2 f(z) + \sum_{i=1}^{nig} \lambda_i \cdot \nabla_{zz}^2 g_i(z) + \sum_{j=1}^{ndes} (\pi_j^{\max} + \pi_j^{\min}) \cdot \nabla_{zz}^2 h_j(z) \quad (\text{A.26})$$

$$L_{z\lambda} = [L_{\lambda z}]^T = \nabla_{z\lambda}^2 L = [\nabla_z g(z)]^T \quad (\text{A.27})$$

$$L_{z\pi^{\min}} = [L_{\pi^{\min} z}]^T = \nabla_{z\pi^{\min}}^2 L = [\nabla_z h(z)]^T \quad (\text{A.28})$$

$$L_{z\pi^{\max}} = [L_{\pi^{\max} z}]^T = \nabla_{z\pi^{\max}}^2 L = [\nabla_z h(z)]^T \quad (\text{A.29})$$

$$L_{s^{\min} \pi^{\min}} = \nabla_{s^{\min} \pi^{\min}}^2 L = -S^{\min} \quad (\text{A.30})$$

$$L_{s^{\max} \pi^{\max}} = \nabla_{s^{\max} \pi^{\max}}^2 L = S^{\max} \quad (\text{A.31})$$

$$L_{s^{\min} s^{\min}} = \nabla_{s^{\min} s^{\min}}^2 L = -\Pi^{\min} \quad (\text{A.32})$$

$$L_{s^{\max} s^{\max}} = \nabla_{s^{\max} s^{\max}}^2 L = \Pi^{\max} \quad (\text{B.33})$$

onde

Π^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de π^{\min} ;

Π^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de π^{\max} ;

I – matriz identidade.

c. Atualização das Variáveis Primais e Duais

A determinação do ponto ótimo se faz através de um processo iterativo. A cada iteração, o sistema linear representado em (A.24) é resolvido, e, logo após, é determinado o comprimento do passo nos espaços primal (α_p) e dual (α_d), de modo que as variáveis de folga sejam todas positivas e os multiplicadores de Lagrange sejam tais que: $\pi^{\min} \leq 0$ e $\pi^{\max} \geq 0$. Desta forma, α_p e α_d são expressos como:

$$\alpha_p = \min \left[\min_{\Delta s_i^{\max} < 0} \frac{-s_i^{\max}}{\Delta s_i^{\max}}, \min_{\Delta s_i^{\min} < 0} \frac{-s_i^{\min}}{\Delta s_i^{\min}}, 1 \right] \quad (\text{A.34})$$

$$\alpha_d = \min \left[\min_{\Delta \pi_i^{\max} < 0} \frac{-\pi_i^{\max}}{\Delta \pi_i^{\max}}, \min_{\Delta \pi_i^{\min} < 0} \frac{-\pi_i^{\min}}{\Delta \pi_i^{\min}}, 1 \right] \quad (\text{A.35})$$

Após o cálculo dos passos primal e dual, a nova aproximação para a solução ótima pode ser obtida pela seguinte atualização:

$$z^{i+1} = z^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta z \quad (\text{A.36})$$

$$(s^{\min})^{i+1} = (s^{\min})^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta s^{\min} \quad (\text{A.37})$$

$$(s^{\max})^{i+1} = (s^{\max})^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta s^{\max} \quad (\text{A.38})$$

$$\lambda^{i+1} = \lambda^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \lambda \quad (\text{A.39})$$

$$(\pi^{\min})^{i+1} = (\pi^{\min})^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \pi^{\min} \quad (\text{a.40})$$

$$(\pi^{\max})^{i+1} = (\pi^{\max})^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \pi^{\max} \quad (\text{a.41})$$

onde

σ – constante para garantir a interioridade da nova estimativa de solução, sendo fixada em 0,9995.

d. Atualização do Parâmetro Barreira

O último passo dentro de cada iteração é recalculer o valor do parâmetro barreira μ . Com os valores de π^{\min} , π^{\max} , s^{\min} e s^{\max} , o cálculo do parâmetro μ é baseado no decréscimo do *gap* de dualidade:

$$\mu = \frac{(s^{\max})^T \cdot \pi^{\max} - (s^{\min})^T \cdot \pi^{\min}}{2 \cdot n \cdot \beta} \quad (\text{A.42})$$

onde

n – número total de variáveis primais e duais;

β – fator de aceleração ($\beta > 1$).

e. Critérios de Convergência

A solução do problema é encontrada quando as equações que representam as condições de otimalidade (A.13) a (A.18) são satisfeitas e o *gap* de dualidade ou parâmetro de barreira é nulo (menor ou igual a uma tolerância especificada). Portanto, os critérios de convergência são:

$$\mu \leq \varepsilon_\mu \quad (\text{A.43})$$

$$\max \left\| \nabla L \right\|_\infty \leq \varepsilon_L \quad (\text{A.44})$$

onde

$\left\| \nabla L \right\|_\infty$ – norma infinita do gradiente da função Lagrangeana;

ε_L – tolerância da norma infinita do gradiente da função Lagrangeana;

ε_μ – tolerância do parâmetro barreira.

ANEXO A – ARTIGO X CBQEE

Mitigação de VTCD em Alimentadores de Distribuição com Bancos de Reguladores de Tensão em Situações de Interrupção de Energia

Signie L. F. Santos^{a,b}, Gustavo H. C. Oliveira^b, Thelma S. P. Fernandes^b

^aDepartamento de Eletricidade, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC
Centro Politécnico da UFPR - Caixa Postal 19067 - Curitiba, Paraná
E-mails: signie@lactec.org.br

^bPrograma de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná
Centro Politécnico da UFPR - Caixa Postal 19011 - Curitiba, Paraná
E-mails: gustavo@eletrica.ufpr.br, thelma@eletrica.ufpr.br

Resumo — Em alimentadores de distribuição com Reguladores de Tensão - RT, após ocorrência de interrupções de energia, cargas pesadas são desconectadas por suas proteções locais e os tapes destes RT, ajustados previamente às interrupções, podem não ser mais adequados ao novo perfil de carga no momento do restabelecimento. Este trabalho apresenta um método que efetua a seleção ótima dos tapes dos RT, nestas situações, através do Fluxo de Potência Ótimo, para o momento do restabelecimento. O método permite a mudança a priori da posição previamente ajustada para a posição ótima identificada. Com isso, tem-se a mitigação das Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD geradas na rede de distribuição. O método proposto é validado com estudo de caso em ambiente de simulação.

Palavras-chaves — Reguladores de Tensão, Variações de Tensão de Curta Duração, Fluxo de Potência Ótimo.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica está diretamente ligada aos níveis de tensão entregues aos consumidores e às variações de tensão ao longo do sistema elétrico. A resolução normativa 469/2011 da ANEEL [1], estabelece os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

Dentre os distúrbios da qualidade de energia limitados pelas normas da legislação vigente, emolduram-se a tensão em regime permanente e as variações de tensão de curta duração, que estão

diretamente ligadas ao desvio da magnitude da tensão do seu valor nominal. Em relação à tensão em regime permanente, estão estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão e os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica. Por outro lado, atualmente a existência significativa de cargas sensíveis às variações de tensão de curta duração (VTCD) incorporadas aos sistemas elétricos impôs a necessidade das concessionárias fornecerem energia elétrica com nível de tensão idealmente constante aos consumidores, cada vez mais exigentes e amparados pelas leis que regulamentam a comercialização de energia.

Nesse contexto, reguladores de tensão são equipamentos muito empregados em sistemas de distribuição de energia elétrica, para o ajuste e correção da tensão aplicada ao longo de alimentadores de distribuição urbanos e rurais, visando atender os limites de tensão em regime permanente especificados pela resolução normativa 469/2011 da ANEEL. O sistema elétrico brasileiro conta com uma extensa rede de distribuição, possuindo alimentadores extensos, com ramais monofásicos e trifásicos, exigindo em alguns casos o emprego de até três bancos de reguladores de tensão ao longo de seu tronco principal, a fim de garantir os níveis de tensão especificados como adequados.

Em situações de interrupções de energia, o ajuste de tapes dos bancos de reguladores de tensão, equipamentos justamente empregados nos sistemas de distribuição para adequar o nível de tensão em regime permanente entregue aos consumidores, acaba acarretando variações de tensão de curta

duração (elevações de tensão ou subtensões) a jusante do local de instalação destes equipamentos. Nestas situações, as cargas pesadas (por exemplo, motores trifásicos de grande porte) que estão conectadas aos alimentadores são desligadas automaticamente devido aos seus sistemas de proteção locais. Isto reduz significativamente o carregamento do alimentador e, nestes casos, os tapes ajustados nos bancos de reguladores, previamente à interrupção de energia não são mais adequados ao novo perfil de carga existente no momento do restabelecimento da energia. Em função deste ajuste inadequado dos tapes dos reguladores de tensão, nessas situações, elevações de tensão ou até mesmo subtensões podem ser geradas a jusante do local de instalação dos bancos de reguladores de tensão conectados em série no alimentador, durante o restabelecimento de sistemas com estas características. Estes distúrbios de tensão observados caracterizam variações de tensão de curta duração, podendo ser elevações de tensão acima de 1,1 pu ou afundamentos de tensão entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo a 3 minutos [1]. A ocorrência destes distúrbios pode causar falhas nos próprios bancos de reguladores de tensão e demais equipamentos da concessionária conectados à rede de energia elétrica, além de danos elétricos às instalações dos consumidores que se mantêm conectados a esta.

Os problemas causados por níveis de tensão inadequados, variações de tensão de curta duração, entre outros distúrbios são amplamente tratados pela comunidade científica. Durante o restabelecimento da energia de modo abrupto, a preocupação principal recai sobre os equipamentos eletrônicos, uma vez que estas sobretensões podem vir a danificar os componentes internos destes equipamentos, conduzindo-os à má operação, ou em casos extremos, à completa inutilização. Vale ressaltar que, a suportabilidade de um equipamento não depende apenas da magnitude da sobretensão, mas também do seu período de duração [2]. Mesmo com estabilizadores acoplados, equipamentos eletrônicos sensíveis, tais como dvds, receptores de satélites, telefones sem fio, computadores, televisores e muitos outros, podem ser danificados em caso de variações maiores do que 15% da tensão nominal da rede, quando os estabilizadores não conseguem filtrar o sinal de tensão [3]. Com relação aos relés de proteção, um aumento de curta duração na tensão pode resultar em uma má operação destes equipamentos. Nos bancos de capacitores, a potência reativa fornecida por eles aumenta com o quadrado da tensão em uma condição de sobretensão, reduzindo sua vida útil consideravelmente. Transformadores, cabos, barramentos, dispositivos de chaveamento, TPs, TCs e máquinas rotativas podem ter a vida útil reduzida. Um conjunto de iluminação pode ter a sua luminosidade aumentada devido às sobretensões e

consequentemente sua vida útil também reduzida[4], [5].

Embora os efeitos causados por VTCD sejam amplamente tratados na comunidade científica, suas origens geralmente são creditadas à falta no sistema elétrico, energização de grandes blocos de carga, entrada de bancos de capacitores ou partida de grandes motores [6]. Não se tem conhecimento de trabalhos que tratem da causa de variações de tensão descrita neste artigo, ajuste inadequado de tapes de reguladores de tensão no restabelecimento de energia após situações de interrupção, entretanto, o problema se caracteriza como real e relevante, e este trabalho pode impulsionar novas discussões a respeito.

Com o objetivo de evitar, ou ao menos minimizar, as VTCD geradas em função do ajuste inadequado dos tapes dos reguladores de tensão, em situações de interrupção de energia, em alimentadores nos quais cargas pesadas (com proteções locais) estão presentes, propõe-se neste artigo o desenvolvimento de um método para a seleção ótima dos tapes dos bancos de reguladores de tensão, de modo que, no momento do religamento da energia, os tapes dos reguladores pertencentes aos bancos de reguladores conectados em série estejam ajustados ao novo perfil previsto de cargas conectadas ao alimentador da rede. O método propõe que, paralelamente ao controle convencional do regulador de tensão, exista um sistema que intervenha no regulador de tensão na detecção de interrupções de energia. Este sistema identifica a posição ideal dos tapes na configuração de interrupção através de um Fluxo de Potência Ótimo - FPO. Espera-se assim mitigar as VTCD geradas na rede e nas instalações elétricas dos consumidores residenciais (cargas leves que continuam conectadas) nessas situações.

A disposição do artigo é a seguinte: na seção II apresenta-se a formulação do FPO utilizado no método proposto para identificar a posição ótima dos tapes nas situações de interrupção de energia; na seção III, apresenta-se o funcionamento básico do RT e o controle convencional deste equipamento. O detalhamento do método proposto neste trabalho é apresentado na seção IV. Na seção V, realiza-se a simulação de um estudo de caso para validar o método proposto e é realizada uma discussão sobre os resultados. Na seção VI são apresentadas as conclusões obtidas no trabalho.

II. FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

O FPO consiste em otimizar um determinado índice de desempenho, retratado através de uma função objetivo, satisfazendo as restrições físicas e operacionais de uma determinada rede elétrica.

Neste trabalho, a função objetivo engloba a manutenção do perfil plano de tensão nas barras do sistema conforme (1).

$$f.o. = \sum_{i=1}^{nb} (\dot{V}_i - 1)^2 \quad (1)$$

Onde:

- **nb**: número de barras;
- $|\dot{V}_i|$: magnitude de tensão na barra i .

As restrições de igualdades são as equações de balanço de potência ativa e reativa (2) e (3), respectivamente.

$$P_g - P_d = \text{real} [\dot{V} \cdot (\dot{Y} \cdot \dot{V})^*] \quad (2)$$

$$Q_g - Q_d = \text{imag} [\dot{V} \cdot (\dot{Y} \cdot \dot{V})^*] \quad (3)$$

Onde:

- **P**: geração de potência ativa ($nb \times 1$);
- **Pd**: demanda de potência ativa ($nb \times 1$);
- **Qd**: demanda de potência reativa ($nb \times 1$);
- **Qg**: geração de potência reativa ($nb \times 1$);
- **Y**: matriz de admitância de barra ($nb \times nb$);
- **V**: tensão fasorial ($nb \times 1$).

As restrições de desigualdades (4)-(7) correspondem aos limites máximos e mínimos de geração de potência ativa, geração de potência reativa, magnitude de tensão e tapes dos reguladores de tensão.

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (4)$$

$$Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \quad (5)$$

$$|\dot{V}|^{\min} \leq |\dot{V}| \leq |\dot{V}|^{\max} \quad (6)$$

$$a^{\min} \leq a \leq a^{\max} \quad (7)$$

A variável **a** representa a relação das magnitudes das tensões dos reguladores de tensão e, no caso do método proposto, é a variável de resposta de interesse para o ajuste otimizado dos tapes dos reguladores de tensão quando ocorrem interrupções de energia nos alimentadores de distribuição.

Para solução do problema de otimização representado pelas equações (1)-(7) utiliza-se o Método dos Pontos Interiores versão Primal-Dual (MPI) [7], já consagrado na literatura para solução de um FPO.

II. REGULADORES DE TENSÃO

Reguladores de tensão são equipamentos muito empregados em sistemas de distribuição, para o

ajuste e correção da tensão aplicada ao longo de alimentadores de distribuição urbanos e rurais. Estão instalados tanto em subestações, quanto em pontos estratégicos da rede de média tensão.

O regulador de tensão é basicamente um autotransformador. Pode-se dizer que para um autotransformador se tornar um regulador de tensão acrescenta-se um comutador de derivações, uma chave reversora e um reator. Na Fig. 1 pode-se observar o esquema de um regulador de tensão [8].

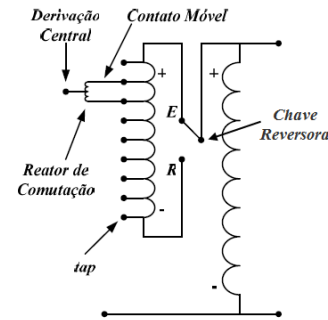


Fig. 1. Esquema do regulador de tensão [8], [9].

O comutador de derivações possui um número de contatos fixos igual ao número de tapes do regulador e mais um contato fixo que determina a posição do tape. A chave reversora determina se o equipamento está efetuando a regulação elevando ou abaixando a tensão de saída do equipamento. A operação do comutador de derivações deve permitir uma variação gradual na tensão de saída sem que haja interrupção na corrente de carga. Para evitar esta interrupção de corrente, utilizam-se dois contatos móveis no lugar de um só e que operam como uma única unidade. Além disso, com o intuito de evitar que ocorra curto circuito entre as espiras do regulador e reduzir o valor da corrente circulante na situação em que os contatos móveis apareçam conectados em derivações adjacentes, insere-se no circuito que interliga os contatos móveis um reator, ao centro do qual se conecta o terminal do regulador.

O regulador de tensão possui além do circuito mecânico já descrito, um circuito de controle que é responsável pela comutação dos tapes sempre que a tensão na saída do regulador viola os limites pré-determinados. Na Fig.2 é apresentado um diagrama de blocos representando o regulador de tensão de maneira geral, com seu circuito mecânico e seu circuito de controle (ajustes estáticos).

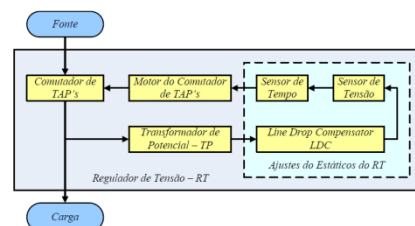


Fig. 1. Diagrama de blocos do regulador de tensão [8], [9].

O circuito clássico de controle do regulador é composto por um sensor de tempo, um sensor de tensão (relé) e por um compensador de queda na linha. Na Fig. 3 pode-se verificar o esquema básico de funcionamento do controle convencional do regulador de tensão.

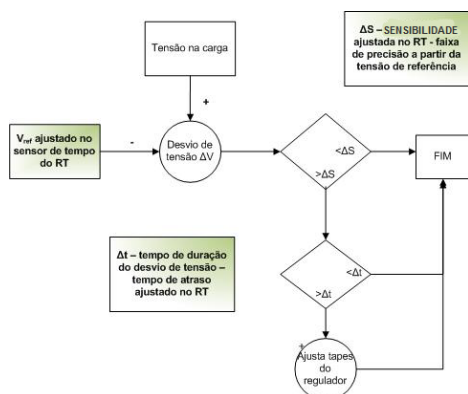


Fig. 3. Diagrama de blocos do controle convencional do regulador de tensão.

O princípio básico de funcionamento do controle do regulador de tensão apresentado na Fig. 3 pode ser descrito da seguinte maneira:

- A tensão de referência desejada é ajustada no regulador de tensão e o TP instalado no lado da carga fornece uma amostra da tensão na mesma. Caso haja uma alteração desta amostra de tensão, para mais ou para menos, o sensor de tensão comanda o comutador de forma a ajustar a tensão no lado da carga até que se tenha a tensão de referência na carga.
- A sensibilidade determina a faixa de precisão, a partir da tensão de referência, dentro da qual o regulador considera que não há necessidade de comutação.
- Para evitar comutações desnecessárias em função de variações rápidas de tensão ou transitórios, pode-se ajustar um atraso de tempo no sensor de tempo do regulador.
- Deste modo, a mudança de tape ocorre somente para variações de tensão que estejam fora dos valores ajustados pela tensão de referência mais a largura de faixa, e por período maior que o determinado neste ajuste.

Cabe ressaltar que, nos reguladores de tensão utilizados atualmente pelas concessionárias em redes de distribuição de energia elétrica, o tempo de comutação dos tapes ainda é limitado pelo princípio mecânico de construção destes equipamentos. Geralmente este tempo de comutação entre dois tapes sequenciais é de 3 a 6 s. Existem protótipos de reguladores de tensão tiristorizados nos quais a comutação não necessita ser sequencial e possui tempo de transição entre duas posições (quaisquer) menor que 1 ciclo. Neste artigo, assume-se o caso dos reguladores de tensão convencionais.

IV. O PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

No controle convencional dos reguladores de tensão, quando ocorrem interrupções de energia, os tapes se mantêm na posição em que se encontravam anteriormente à interrupção. Nestas situações, a configuração dos tapes, previamente ajustada, pode não ser mais adequada para o momento do restabelecimento do sistema em função de muitas cargas pesadas (por exemplo, motores trifásicos de grande porte) terem sido desconectadas dos alimentadores pela atuação automática de suas proteções internas. Quando o carregamento do alimentador é reduzido significativamente e ocorre o restabelecimento do sistema com os tapes dos reguladores ajustados conforme a situação pré-interrupção, níveis inaceitáveis de sobretensões ou sub-tensões são gerados no sistema, sendo estes sentidos tanto pelos próprios bancos de reguladores de tensão e demais equipamentos conectados à rede quanto pelos consumidores (cargas leves) que ainda continuam conectados ao alimentador.

Assim sendo, o método proposto neste trabalho consiste em adicionar em paralelo ao circuito de controle convencional do regulador de tensão, um controle no qual seja implementada a seleção ótima de tapes dos reguladores de tensão. A seleção ótima é identificada por meio do FPO, quando ocorrer uma interrupção de energia no sistema, visando a mitigação das variações de tensão de curta duração que ocorrem nestas situações e consequentemente de seus efeitos a jusante dos locais de instalação dos bancos de reguladores.

Primeiramente, no método proposto deve-se monitorar o perfil de tensão na entrada dos reguladores de tensão e identificar os momentos em que há uma interrupção de energia no sistema, ou seja, tensão igual à zero.

Na situação em que o perfil de tensão medido na entrada do regulador é diferente de zero, o controle convencional de ajuste dos tapes é mantido nos reguladores de tensão. Quando esse perfil de tensão é igual a zero, indicando uma falta em algum ponto do sistema, um comando é acionado, fazendo com que o ajuste dos tapes seja realizado pelo método proposto. Neste caso, soluciona-se o FPO, utilizando os parâmetros da rede, mas considerando-se que apenas cargas baixas, isto é, cargas que não seriam desligadas devido as suas proteções locais (aqui definidas como cargas abaixo de 80 kW – 40 kvar, mas que podem ser especificadas pelo usuário do sistema), estão conectadas ao alimentador. O FPO é solucionado, otimizando-se o perfil de tensão e, consequentemente, indicando as posições adequadas para os tapes dos reguladores de tensão. Um comando então é enviado aos reguladores de tensão, de maneira que, os tapes sejam direcionados da posição em que se encontravam antes da interrupção de energia para a posição ótima na qual

os mesmos devem estar ajustados no momento do restabelecimento do sistema. Assim que a medição do perfil de tensão na entrada do alimentador deixa de ser nula, o controle convencional volta a ser utilizado de modo que na medida em que as cargas pesadas forem sendo reconectadas no alimentador os tapes vão sendo ajustados visando manter o nível de tensão dentro dos limites estabelecidos pela resolução normativa 469/2011 da ANEEL. Na Fig. 4, pode-se verificar o fluxograma do método proposto como possível solução para o problema de elevações de tensão e sobtensões momentâneas geradas nos sistemas de distribuição em função do ajuste inadequado dos tapes dos reguladores de tensão quando ocorrem interrupções de energia nesses sistemas.

O método proposto também leva em consideração o caso de alimentadores que contam com bancos de reguladores conectados em série, caso no qual os bancos de reguladores conectados em série necessitam saber o ajuste de tapes identificado para os alimentadores a montante deles, já que este ajuste é dinâmico, evitando assim identificar ajustes inadequados para os bancos de RT conectados em série. Sendo assim, o método alimenta os bancos de RT com os tapes dos bancos de reguladores a montante destes conforme os ajustes são realizados, enquanto o fornecimento de energia está interrompido, e o ajuste daqueles já é realizado levando-se em conta os ajustes identificados para os bancos de reguladores que estão conectados em locais anteriores no alimentador.

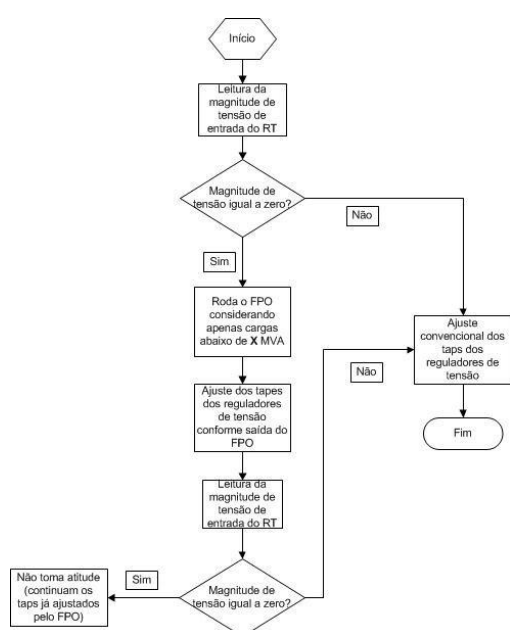


Fig. 4. Fluxograma do método proposto.

IV. ESTUDO DE CASO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os testes e validações do método proposto para a seleção ótima de tapes de reguladores de tensão e consequente mitigação das variações de tensão de curta duração em situações de interrupção de energia, em alimentadores com as características descritas, foram realizados em ambiente de simulação na interface *Simulink* do *software* Matlab.

Modelou-se um sistema de distribuição baseado no sistema IEEE 123-barras apropriado para estudos relacionados a problemas de ajustes de tensão. O sistema modelado representa um alimentador de distribuição trifásico equilibrado com 55 barras, tensão nominal 4,16 kV e com três bancos de reguladores de tensão conectados em série ao longo do alimentador. Os dados de linha e de barra do sistema simulado estão apresentados na Tabela I.

Visando realizar o estudo de caso do problema descrito, simulou-se no sistema modelado uma falta na saída da subestação (Barra 35) com duração de 200 s e posterior restabelecimento do sistema. Então foram avaliadas as tensões ao longo do alimentador na situação em que apenas o controle convencional do regulador atua e na situação em que o controle proposto atua. Na situação em que o controle convencional é utilizado, quando ocorrem interrupções de energia, o tape deste equipamento permanece na posição previamente ajustada para o sistema. Já na situação em que o método proposto é utilizado o controle convencional atua no regulador enquanto não há interrupção de energia. Quando esta ocorre, a seleção ótima dos tapes dos reguladores de tensão é identificada através do FPO no sistema. Além disso, visando caracterizar as cargas pesadas conectadas ao alimentador, considerou-se que para as cargas acima de 80 kW - 40 kVAr existem proteções locais que as desconectam da rede em situações de interrupções de energia.

TABELA I. DADOS DO SISTEMA SIMULADO.

Dados de Linha					Dados de Barra		
De	Para	R (ohm)	X (ohm)	Dist. (m)	Barra	P (kW)	Q (kvar)
35	1	0,1194	0,2757	416,6	1	50	200
1	2	0,1194	0,2757	416,6	2	20	100
1	3	0,1259	0,2903	360,8	3	0	0
1	7	0,0620	0,1431	177,7	4	40	200
3	4	0,1215	0,2803	348,2	5	20	100
3	5	0,1327	0,3060	380,3	6	40	200
5	6	0,1259	0,2903	360,8	7	100	500
7	8	0,0620	0,1431	177,7	8	0	0
8	9	0,1194	0,2757	416,6	9	40	200
8	12	0,1237	0,2853	354,5	10	100	500
9	14	0,1194	0,2757	416,6	11	100	500
13	18	0,0620	0,1431	177,7	12	40	200
13	34	0,1194	0,2757	416,6	13	40	200
14	10	0,1194	0,2757	416,6	14	0	0
14	11	0,1194	0,2757	416,6	15	0	0
14	13	0,1132	0,2612	324,4	16	40	200

15	16	0,1194	0,2757	416,6	17	20	100
15	17	0,1194	0,2757	416,6	18	0	0
18	19	0,1194	0,2757	416,6	19	40	200
18	21	0,0620	0,1431	177,7	20	100	500
19	20	0,1194	0,2757	416,6	21	0	0
21	22	0,1194	0,2757	416,6	22	40	200
21	23	0,0620	0,1431	177,7	23	0	0
23	24	0,1194	0,2757	416,6	24	100	500
23	25	0,0620	0,1431	177,7	25	0	0
25	26	0,1194	0,2757	416,6	26	0	0
25	28	0,1194	0,2757	416,6	27	0	0
26	27	0,1761	0,4074	504,7	28	40	200
26	31	0,1194	0,2757	416,6	29	100	500
27	33	0,1761	0,4074	504,7	30	100	500
28	29	0,1194	0,2757	416,6	31	100	500
29	30	0,1194	0,2757	416,6	32	10	50
30	36	0,1194	0,2757	416,6	33	10	50
31	32	0,1194	0,2757	416,6	34	40	200
33	37	0,1194	0,2757	416,6	35	0	0
34	15	0,1194	0,2757	416,6	36	40	200
37	38	0,1761	0,4074	504,7	37	100	500
38	39	0,1761	0,4074	504,7	38	40	200
39	40	0,1761	0,4074	504,7	39	100	500
40	55	0,1194	0,2757	416,6	40	40	200
41	42	0,1194	0,2757	416,6	41	0	0
42	43	0,1194	0,2757	416,6	42	100	500
43	44	0,1194	0,2757	416,6	43	40	200
45	41	0,1194	0,2757	416,6	44	100	500
45	46	0,1194	0,2757	416,6	45	0	0
46	47	0,1194	0,2757	416,6	46	40	200
48	45	0,1194	0,2757	416,6	47	100	500
48	49	0,1194	0,2757	416,6	48	0	0
49	50	0,1194	0,2757	416,6	49	40	200
50	51	0,1194	0,2757	416,6	50	0	0
51	52	0,1194	0,2757	416,6	51	100	500
52	53	0,1194	0,2757	416,6	52	100	500
53	54	0,1194	0,2757	416,6	53	100	500
55	48	0,1194	0,2757	416,6	54	40	200
-	-	-	-	-	55	0	0

Os reguladores de tensão considerados estão alocados nas barras 14, 25 e 40, e possuem 17 tapas, sendo 8 elevadores, 8 abaixadores e 1 tapa neutro e o tempo de comutação entre tapas sequenciais é de 4 s. As tensões monitoradas foram: tensão de saída da subestação (B35) e tensões de saída dos reguladores (B14, B25 e B40). Além disso, monitorou-se a potência ativa e reativa conectada aos reguladores. O tempo de simulação utilizado foi de 300 s, sendo que em 100 s ocorre uma interrupção de energia na subestação, ocasionando a desconexão das cargas das cargas consideradas pesadas, e com 200 s ocorre o restabelecimento de energia. A partir do momento que acontece o restabelecimento do sistema em as cargas pesadas vão sendo aos poucos reconectadas na rede.

Os resultados obtidos nas simulações para o caso do controle convencional e para o método proposto estão apresentados, respectivamente, na Fig. 6 e na Fig. 7.

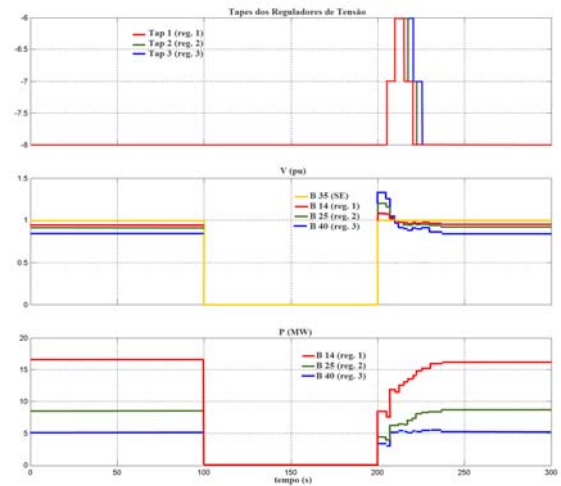


Fig. 6. Regulator de Tensão c/ Controle Convencional.

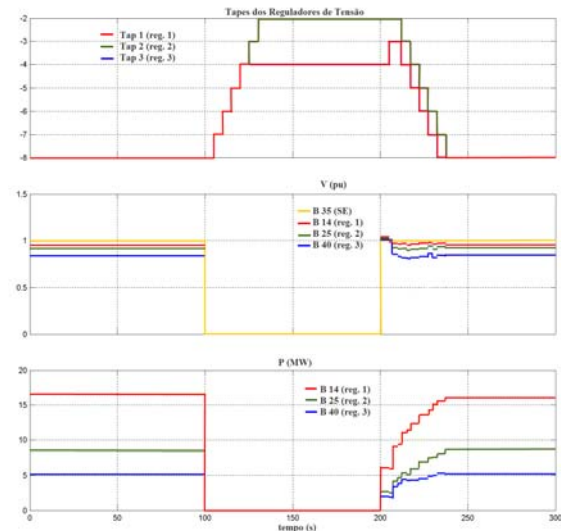


Fig. 7. Regulator de Tensão c/ Controle pelo Método Proposto.

Verifica-se na simulação do sistema modelado com reguladores de tensão com controle convencional, Fig. 6, que, na situação pré-interrupção de energia (operação em regime permanente), os tapas dos três reguladores de tensão conectados à rede se encontravam na posição -8 (elevação de tensão) para compensar a queda de tensão existente ao longo do alimentador. Durante a interrupção de energia (100 - 200 s) os tapas que estavam ajustados na situação de operação normal da rede continuam fixos nas mesmas posições. Em função dos tapas dos reguladores de tensão estarem previamente ajustados para uma situação na qual o carregamento era mais pesado, elevações de tensão de 9%, 21% e 33% ocorrem à jusante dos reguladores de tensão conectados às barras 14, 25 e 40, respectivamente. Estas elevações de tensão são caracterizadas como variações de tensão de curta duração, pois ocorrem até que haja tempo suficiente

para o controle convencional dos reguladores de tensão realizar a comutação para a nova posição adequada (3 s para cada mudança de posição). Nesta situação simulada, quando apenas o controle convencional está ativo no regulador de tensão, o problema tratado neste trabalho fica evidenciado.

Já na simulação na qual foi utilizado o método proposto para efetuar a seleção ótima de tapes do regulador (Fig. 7), quando ocorre a interrupção de energia e há mudança no perfil de cargas conectadas ao alimentador, no momento do restabelecimento de energia os tapes dos reguladores de tensão já são adequados ao novo perfil de cargas conectadas ao alimentador, sendo identificadas as posições ótimas para esse caso em -4, -2 e -2 para os reguladores 1, 2 e 3, respectivamente. Portanto, enquanto o fornecimento de energia esta interrompido, os tapes foram mudados da posição -8, ideal para o momento anterior à interrupção, para as posições ótimas identificadas, evitando assim que elevações de tensão fossem transmitidas às cargas que permaneceram conectadas ao alimentador. Assim que ocorre o restabelecimento de energia, a seleção dos tapes volta a ser realizada através do controle convencional do regulador e os tapes vão se adequando conforme as cargas pesadas são reinseridas no sistema.

Outras situações, com diferentes localizações da falta, e diferentes configurações das cargas também foram simuladas. Verificou-se que em todos os casos que ocorre uma interrupção de energia antes da entrada de um regulador de tensão, quando o método não é implementado, são geradas VTCD, tanto elevações de tensão conforme mostrado neste estudo de caso quanto afundamentos de tensão que ocorrem quando são simulados alimentadores nos quais em regime permanente os tapes dos reguladores de tensão estão ajustados para realizar o abaixamento da tensão na linha. Em todas estas situações quando o método foi implementado o mesmo se mostrou eficaz, mitigando as variações de tensão de curta duração.

A implementação do método proposto na prática em reguladores de tensão pode parecer complexo, entretanto, considerando que na filosofia do *Smart Grid*, haverá maior facilidade no monitoramento dos parâmetros da rede, vislumbra-se que o método tem possibilidades de ser implementado. Nesse caso, seriam necessárias alterações no circuito de controle dos reguladores de tensão que permitissem a entrada de comandos em função das respostas obtidas no fluxo de potência ótimo do sistema em tempo real durante interrupções de energia. Paralelamente, cabe ressaltar que um ajuste adicional ao controle convencional do regulador de tensão que efetuasse durante interrupções de energia a mudança do tape previamente ajustado para o tape neutro já minimizaria os níveis de elevações de tensão ou sub tensões geradas na rede

nas situações tratadas, entretanto, as mesmas não seriam eliminadas conforme ocorre no método proposto.

II. CONCLUSÕES

Com este trabalho, mostrou-se que em situações de interrupções de energia em sistemas com características de cargas pesadas e leves em um mesmo alimentador, o ajuste de tapes proporcionado pelo controle convencional dos reguladores de tensão pode ocasionar sobretensões na rede de distribuição e consequentemente nos consumidores conectados a esta.

A fim de contornar este inconveniente, este trabalho propôs um método para efetuar a seleção ótima dos tapes através de um FPO durante a interrupção de energia. Quando ocorre o restabelecimento do sistema, o tape já está ajustado de acordo com o novo perfil de cargas conectado ao sistema e posteriormente ao restabelecimento, o ajuste volta a ser feito através do controle convencional do regulador. Assim, não são geradas sobretensões no sistema, conforme o objetivo pretendido neste trabalho.

O trabalho também demonstrou a vantagem do uso de reguladores de tensão dotados de potencial de programação de seus tapes para a condição de religamento após uma falta, no que tange a sobretensões.

Pode-se vislumbrar como avanço deste trabalho implementar em paralelo um mecanismo para a detecção do estado das cargas visando estimar o estado pós-distúrbio de maneira mais eficaz.

III. REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica," vol. 8.0, , 2011.
- [2] F. E. da Silva, "PROTÓTIPO DE PROTETOR DE SOBRETENSÃO DIGITAL," UNICEUB - Centro Universitário de Brasília, 2008.
- [3] N. C. Braga, "Protetor de Equipamentos," *Saber Eletrônico*, pp. 1–6, 2008.
- [4] R. C. et al Dugan, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [5] A. Kusko and M. T. Thompson, *Power Quality in Electrical Systems*. McGraw-Hill, 2007.
- [6] P. de Carvalho, "Uma Contribuição ao Estudo da Depressão de Tensão," Escola Federal de Itajubá, 1997.
- [7] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Methods," 1994.
- [8] M. L. Alves, "Módulo de Alocação Otimizada de Reguladores de Tensão e Bancos de Capacitores em Alimentadores de Distribuição," Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2005.
- [9] I. Szuvovivski, "Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo," Universidade Federal do Paraná, 2008.

ANEXO B – DADOS DOS SISTEMAS SIMULADOS

Tabela 1 – Dados de linha e de barra do sistema radial 36 barras

Dados de Linhas						Dados de Barras		
Linha	De	Para	d (km)	R (ohms)	X (ohms)	Barra	P (W)	Q (var)
1	35	1	0,4166	0,1194	0,2753	1	50000	20000
2	1	2	0,4166	0,1194	0,2753	2	20000	10000
3	1	3	0,4394	0,1259	0,2904	3	0	0
4	1	7	1,4166	0,4060	0,9361	4	40000	20000
5	3	4	0,4242	0,1216	0,2803	5	20000	10000
6	3	5	0,4632	0,1327	0,3061	6	40000	20000
7	5	6	0,4394	0,1259	0,2904	7	100000	50000
8	7	8	0,4166	0,1194	0,2753	8	0	0
9	8	12	0,4319	0,1238	0,2854	9	40000	20000
10	8	9	0,4166	0,1194	0,2753	10	100000	50000
11	9	14	0,4166	0,1194	0,2753	11	100000	50000
12	14	10	0,5122	0,1468	0,3385	12	40000	20000
13	14	11	0,4166	0,1194	0,2753	13	40000	20000
14	14	13	0,3953	0,1133	0,2612	14	0	0
15	13	34	0,4166	0,1194	0,2753	15	0	0
16	13	18	0,4166	0,1194	0,2753	16	40000	20000
17	34	15	0,4166	0,1194	0,2753	17	20000	10000
18	15	16	0,5738	0,1644	0,3792	18	0	0
19	15	17	0,4166	0,1194	0,2753	19	40000	20000
20	18	19	0,4166	0,1194	0,2753	20	100000	50000
21	18	21	0,3277	0,0939	0,2165	21	0	0
22	19	20	0,4166	0,1194	0,2753	22	40000	20000
23	21	22	0,2595	0,0744	0,1715	23	0	0
24	21	23	0,7841	0,2247	0,5181	24	100000	50000
25	23	24	0,4166	0,1194	0,2753	25	0	0
26	23	25	0,9301	0,2666	0,6146	26	0	0
27	25	26	0,4166	0,1194	0,2753	27	0	0
28	26	28	0,5567	0,1595	0,3679	28	40000	20000
29	26	27	0,2675	0,0767	0,1768	29	100000	50000
30	26	31	0,3995	0,1145	0,2640	30	100000	50000
31	27	33	0,4166	0,1194	0,2753	31	100000	50000
32	28	29	0,4166	0,1194	0,2753	32	10000	5000
33	31	32	0,4692	0,1345	0,3100	33	10000	5000
34	29	30	0,4166	0,1194	0,2753	34	40000	20000
35	30	36	0,3854	0,1105	0,2547	35	0	0
-	-	-	-	-	-	36	40000	20000

Tabela 2 – Dados de linha e de barra do sistema radial 55 barras

Dados de Linhas						Dados de Barras		
Linha	De	Para	d (km)	R (ohms)	X (ohms)	Barra	P (W)	Q (var)
1	35	1	0,4166	0,1194	0,2753	1	50000	20000
2	1	2	0,4166	0,1194	0,2753	2	20000	10000
3	1	3	0,4394	0,1259	0,2904	3	0	0
4	1	7	0,2166	0,0621	0,1431	4	40000	20000
5	3	4	0,4242	0,1216	0,2803	5	20000	10000
6	3	5	0,4632	0,1327	0,3061	6	40000	20000
7	5	6	0,4394	0,1259	0,2904	7	100000	50000
8	7	8	0,2322	0,0665	0,1534	8	0	0
9	8	12	0,4319	0,1238	0,2854	9	40000	20000
10	8	9	0,4166	0,1194	0,2753	10	100000	50000
11	9	14	0,4166	0,1194	0,2753	11	100000	50000
12	14	10	0,5122	0,1468	0,3385	12	40000	20000
13	14	11	0,4166	0,1194	0,2753	13	40000	20000
14	14	13	0,3953	0,1133	0,2612	14	0	0
15	13	34	0,4166	0,1194	0,2753	15	0	0
16	13	18	0,2504	0,0718	0,1655	16	40000	20000
17	34	15	0,4166	0,1194	0,2753	17	20000	10000
18	15	16	0,4275	0,1225	0,2825	18	0	0
19	15	17	0,4166	0,1194	0,2753	19	40000	20000
20	18	19	0,4166	0,1194	0,2753	20	100000	50000
21	18	21	0,2077	0,0595	0,1372	21	0	0
22	19	20	0,4166	0,1194	0,2753	22	40000	20000
23	21	22	0,2595	0,0744	0,1715	23	0	0
24	21	23	0,1941	0,0556	0,1283	24	100000	50000
25	23	24	0,4166	0,1194	0,2753	25	0	0
26	23	25	0,2301	0,0659	0,1521	26	0	0
27	25	26	0,4166	0,1194	0,2753	27	0	0
28	26	28	0,4567	0,1309	0,3018	28	40000	20000
29	26	27	0,1175	0,0337	0,0776	29	100000	50000
30	26	31	0,3995	0,1145	0,2640	30	100000	50000
31	27	33	0,1166	0,0334	0,0770	31	100000	50000
32	28	29	0,4166	0,1194	0,2753	32	10000	5000
33	31	32	0,4692	0,1345	0,3100	33	10000	5000
34	29	30	0,4166	0,1194	0,2753	34	40000	20000
35	30	36	0,3854	0,1105	0,2547	35	0	0
36	33	37	0,4166	0,1194	0,2753	36	40000	20000
37	37	38	0,3166	0,0907	0,2092	37	100000	50000
38	38	39	0,6166	0,1767	0,4075	38	40000	20000
39	39	40	0,6166	0,1767	0,4075	39	100000	50000
40	40	55	0,4166	0,1194	0,2753	40	40000	20000
41	55	48	0,3297	0,0945	0,2179	41	0	0

42	48	45	0,3988	0,1143	0,2635	42	100000	50000
43	48	49	0,5176	0,1483	0,3420	43	40000	20000
44	45	41	0,4166	0,1194	0,2753	44	100000	50000
45	45	46	0,5563	0,1594	0,3676	45	0	0
46	49	50	0,4166	0,1194	0,2753	46	40000	20000
47	41	42	0,4089	0,1172	0,2702	47	100000	50000
48	46	47	0,4932	0,1413	0,3259	48	0	0
49	50	51	0,4166	0,1194	0,2753	49	40000	20000
50	51	52	0,4095	0,1174	0,2706	50	0	0
51	42	43	0,4102	0,1176	0,2711	51	100000	50000
52	52	53	0,4095	0,1174	0,2706	52	100000	50000
53	43	44	0,5219	0,1496	0,3449	53	100000	50000
54	53	54	0,4166	0,1194	0,2753	54	40000	20000
55	-	-		0,0000	0,0000	55	0	0